Ber. Naturf. Ges. Freiburg i. Br., Freiburg, 114 (2024), 155–211

Die große Slowenien-Exkursion 2023

The big Slowenia field trip

Werner Konold[1], Ingrid Stober[2], Peter Wattendorf[3], Wolfgang Werner[4]

[1] Alemannenhof 23, 79199 Kirchzarten
E-Mail: werner.konold@landespflege.uni-freiburg.de

[2] Institut für Geo- und Umweltnaturwissenschaften, Universität Freiburg, Albertstr. 23b, 79104 Freiburg i. Br
E-Mail: ingrid.stober@minpet.uni-freiburg.de

[3] Silbergasse 6, 79359 Riegel
E-Mail: peter.wattendorf@landespflege-freiburg.de

[4] Im Rebstall 7, 79285 Ebringen
E-Mail: awa.werner@t-online.de

Zusammenfassung

Die Exkursion mit insgesamt 14 Teilnehmerinnen und Teilnehmern führte uns in den westlichen Teil von Slowenien in die Gegend um Postojna und Divaca, auf die Karsthochfläche Trnovski Gozd und schließlich in den Nordwesten in die Julischen Alpen. Ziel war, das Land überhaupt etwas kennen zu lernen, insbesondere aber uns mit den Erscheinungsformen des Karsts und der Karsthydrologie zu beschäftigen, also beispielsweise mit Poljen, Ponoren, Höhlen und Karstquellen. Wir folgten zum einen dem Lauf des Rak, der in seinem Verlauf mit dem Versinken im Untergrund und seinem Wiederauftauchen immer wieder neue Namen annimmt, zum anderen der Reka, die auf spektakulärste Weise in den Höhlen und Klüften des UNESCO-Biosphärenreservats Škocjanske Jame verschwindet, um an der Adriaküste eine mächtige Karstquelle zu speisen. Völlig frei von Oberflächengewässern ist die angesprochene Karsthochfläche Trnovski Gozd, wo das Niederschlagswasser in zahllosen, oft direkt aneinandergrenzenden Dolinen in die Karstklüfte eindringt. Ein Highlight war hier die Paradana-Eishöhle. Im Einzugsgebiet der Soča faszinierten uns die tiefen, engen Schluchten, die – tektonisch bedingt – der Fluss und seine Zuflüsse geschaffen haben, angefüllt mit kaltem, klarem, „blauem“ Wasser. Der Boka-Wasserfall, ein hoch aus dem Berg stürzender Fluss, vermittelte einen Eindruck der extremen hydrologischen Dynamik dieser Landschaft.

Schlüsselwörter Slowenien, Karst, Karstformen, Karsthydrologie, Kulturlandschaft

Summary

The excursion with a total of 14 participants took us to the western part of Slovenia to the area around Postojna and Divaca, to the Trnovski Gozd karst plateau and finally to the northwest into the Julian Alps. The aim was to get to know the country a bit, but in particular to deal with the phenomena of karst and karst hydrology, for example with poles, ponors, caves and karst springs. On the one hand, we followed the course of the river Rak, which continually takes on new names as it sinks underground and reappears, and on the other hand, the Reka, which disappears in the most spectacular way into the caves and crevices of the UNESCO Škocjanske Jame

biosphere reserve to feed a mighty karst spring on the Adriatic coast. The Trnovski Gozd karst plateau is completely free of surface water, where rainwater penetrates into the karst fissures in countless, often directly adjacent sinkholes. A highlight here was the Paradana ice cave. In the Soča catchment area, we were fascinated by the deep, narrow gorges that – for tectonic reasons – the river and its tributaries have created, filled with cold, clear, "blue" water. The Boka Waterfall, a river cascading high from the mountain, gave an impression of the extreme hydrological dynamics of this landscape.

Keywords Slovenia, karst, karst phenomena, karst hydrology, cultural landscape

Inhaltsverzeichnis

1 Einführung . . . 157
2 Geologie und Tektonik . . . 158
2.1 Geologische Entwicklung . . . 161
2.2 Strukturgeologie . . . 164
3 Klima . . . 165
4 Gewässernetz Sloweniens . . . 166
5 Verkarstung und Karstformen . . . 167
5.1 Der Prozess der Verkarstung . . . 167
5.2 Karsthydrologischer Formenschatz . . . 170
6 Erkenntnis- und Forschungsgeschichte . . . 174
7 Exkursion . . . 177
7.1 Flussgebiet des Rak . . . 177
7.1.1 Loško Polje, Cerkniško Polje . . . 177
7.1.2 Rakov Škocjan . . . 183
7.1.3 Planinsko Polje . . . 183
7.1.4 Höhlenpfad bei Laze . . . 191
7.2 Flussgebiet der Reka . . . 192
7.2.1 Škocjanske Jame . . . 192
7.2.2 Dorf Škocjan, Reka, Grad Školj . . . 196
7.3 Trnovski Gozd . . . 198
7.3.1 Karstentwaldung und -aufforstung . . . 199
7.3.2 Vegetationsumkehr in Dolinen und tiefen Höhlen . . . 200
7.3.3 Paradana-Eishöhle . . . 201
7.4 Soča-Tal . . . 203
7.4.1 Fluss und Tal . . . 203
7.4.2 Kozjak-Wasserfall . . . 204
7.4.3 Boka-Wasserfall . . . 205
7.4.4 Isonzo-Front . . . 206
7.5 Bergwerk Raibl . . . 207

1 Einführung

Vom 28. Mai bis zum 3. Juni 2023 fand die Exkursion „Gewässer und Karst in Slowenien“ statt. Das kleine Land Slowenien hat unglaublich viel an naturkundlichen Phänomenen zu bieten. Es ist das Land, in dem die Karstforschung begann, viele fachliche Termini sind slowenischen Ursprungs. Was uns außerdem nach Slowenien geführt hat, war die Tatsache, dass Peter Wattendorf und Werner Konold vor Jahren mehrere Male studentische Exkursionen dorthin angeboten haben. Die letztjährige Exkursion folgte im Wesentlichen deren Spuren (Abb. 1). Für die ersten Nächte hatten wir uns in Bungalows auf dem Campingplatz Pivka Jama bei Postojna eingemietet, die anderen Nächte verbrachten wir in Kobarid an der Soča.

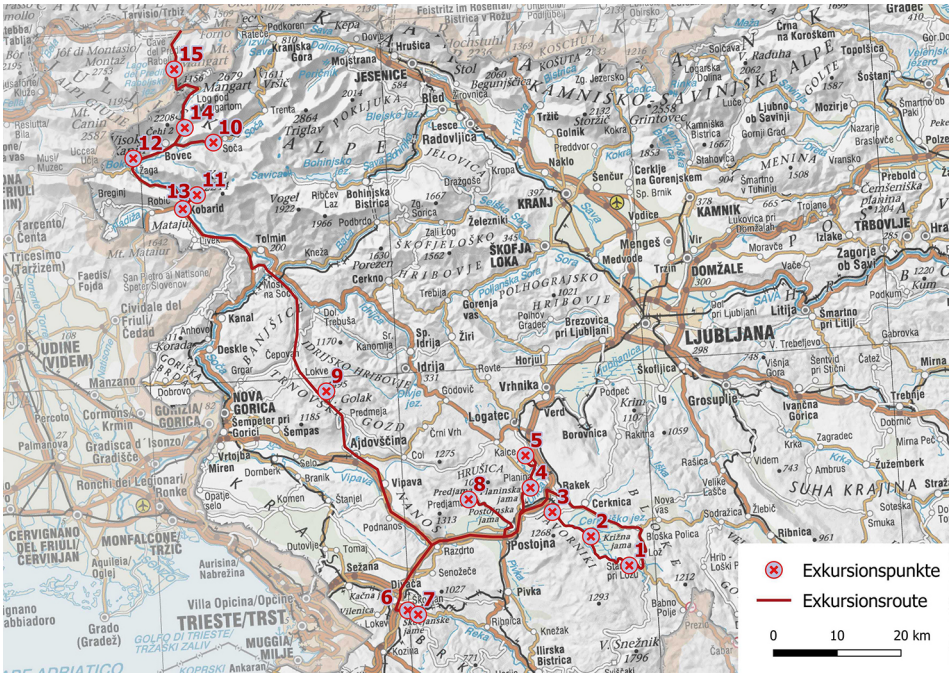


Abb. 1: Exkursionsroute: (1) Loško Polje, (2) Cerkniško Polje, (3) Rakov Škocjan, (4) Planinsko Polje, (5) Höhlen-Pfad bei Laze, Vranja Jama, (6) Škocjanske jame, (7) Dorf Škocjan, Reka, Grad Školj/Neukhoeffel (8) Predjamski Grad, (9) Trnovski Gozd, Paradana-Eishöhle, Karst-Aufforstung, (10) Sočatal, (11) Kozjak-Wasserfall, (12) Boka-Wasserfall, (13) Museum Kobarid, (14) Kluže, (15) Bergwerk in Raibl.

Fig. 1: Field trip itinerary: (1) Loško Polje, (2) Cerkniško Polje, (3) Rakov Škocjan, (4) Planinsko Polje, (5) Cave walk near Laze, Vranja Jama, (6) Škocjanske jame, (7) Village Škocjan, Reka, Grad Školj/Neukhoeffel, (8) Predjamski Grad, (9) Trnovski Gozd, Paradana Icecave, Reforestation of the Karst, (10) Soča Valley, (11) Waterfall Kozjak, (12) Waterfall Boka, (13) Museum in Kobarid, (14) Kluže, (15) Mining in Raibl.

Die Teilnehmerinnen und Teilnehmer waren: Stefan Ganter, Irmtraud Grimm, Bernhard Grimm, Manuel Hugelmann, Philipp Hugelmann, Reinhold Jörger, Herta Konold, Werner Konold, Gundo Klebsattel, Heike Puhlmann, Jörg Rudolph, Ingrid Stober, Peter Wattendorf, Wolfgang Werner. Wir hatten zwei Kleinbusse gemietet und bewältigten die Strecken hin und zurück jeweils an einem Tag – anstrengend, doch machbar.

Das Gebiet des heutigen Sloweniens wurde Anfang des 6. Jahrhunderts von den Slawen besiedelt, die das Fürstentum Karantanien gründeten. Im Jahr 788 eroberten die Franken das Gebiet und die Bistümer Aquileia und Salzburg missionierten es. Im 11. Jahrhundert wurde das Land in das Heilige Römische Reich eingegliedert und 1364 zum Herzogtum Krain erhoben. In den folgenden Jahrhunderten geriet das Territorium an die Habsburgermonarchie. Nach der Auflösung Österreich-Ungarns 1918 ging das vormalige Kronland im neu gegründeten Königreich Jugoslawien auf. Nach dem Ende des Zweiten Weltkrieges existierte Slowenien als Teilrepublik im sozialistischen Jugoslawien. Nach der Unabhängigkeitserklärung am 25. Juni 1991 und dem 10-Tage-Krieg wurde Slowenien ein eigenständiger Nationalstaat und am 22. Mai 1992 eigenständiges Mitglied der UNO. Im Jahr 2004 trat Slowenien der EU und der NATO bei, 2007 auch der Eurozone. Das Land ist eine demokratisch verfasste parlamentarische Republik.

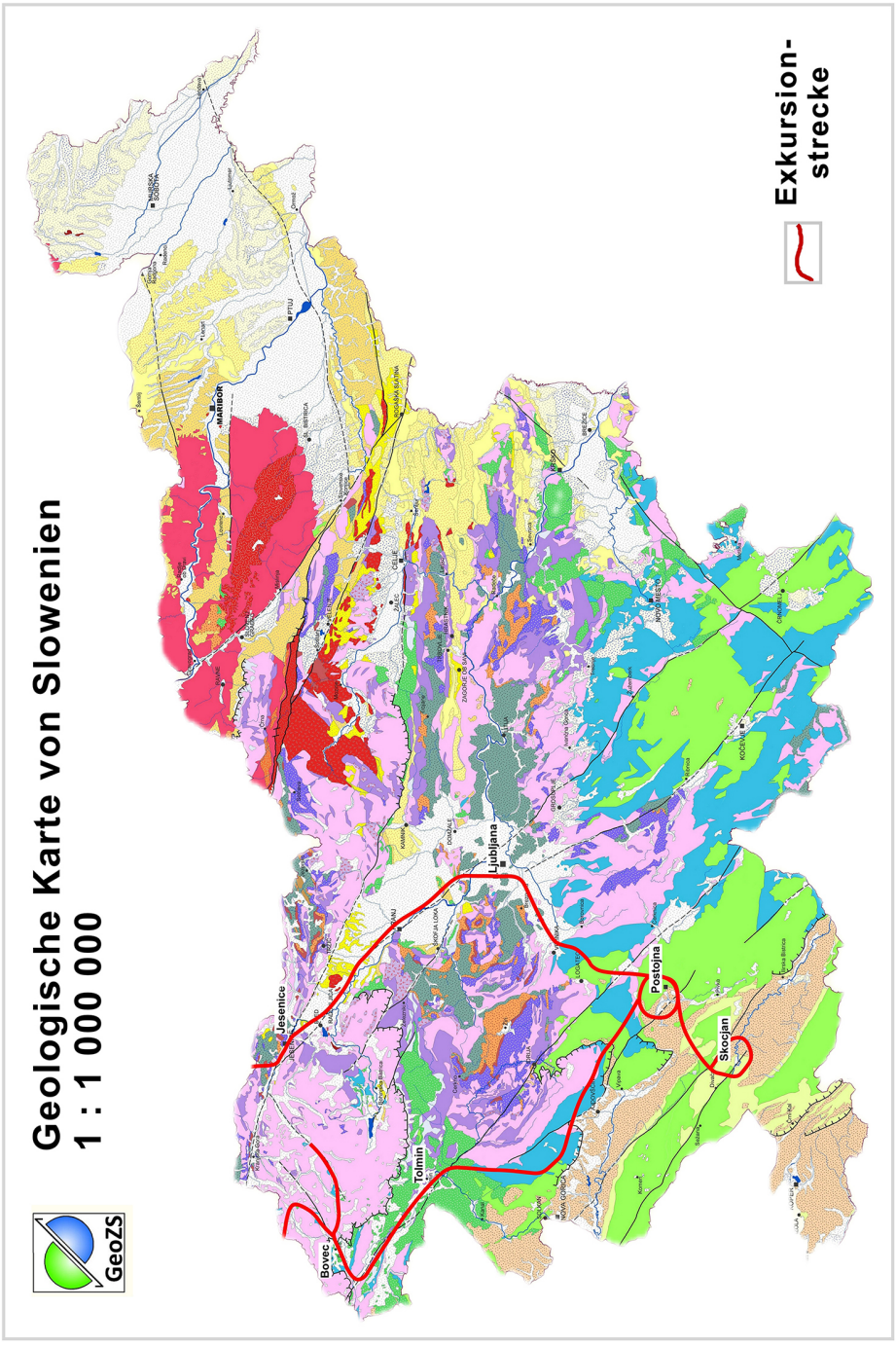
Die Fläche des Landes umfasst 20.273 km², es ist damit etwa so groß wie Hessen. Von den rund 2.121.000 Einwohnern leben knapp 300.000 in der Hauptstadt Ljubljana. Die Amtssprache ist Slowenisch, eine slawische Sprache mit ganz eigenem Charakter (im Vergleich zum Kroatischen und Serbischen), in den Grenzgebieten zu Italien und Ungarn werden auch die Sprachen dieser beiden Länder gesprochen. Das Land hat Anteile am mediterranen, pannonischen und alpinen Gebiet. Die Küstenlinie an der Adria ist lediglich 46.6 km lang. Die höchste Erhebung ist in den Julischen Alpen der Triglav mit 2864 m, der auch die Flagge Sloweniens ziert[1].

2 Geologie und Tektonik

Wie die Abb. 2 zeigt, führte die lange geologisch-tektonische Entwicklung Sloweniens zu einem sehr abwechslungsreichen und komplizierten geologischen Bau. Die ältesten Gesteine stammen aus dem Präkambrium. Unsere Exkursion konzentrierte sich auf den westlichen Teil Sloweniens und damit auf das klassische Karstgebiet (Abb. 1). Daher beschränkt sich die nachstehende geologische und tektonische Beschreibung hauptsächlich auf diesen Teil Sloweniens.

Der deutsche Name „Karst“ geht ebenso wie der slowenische Begriff „Kras“ auf den lateinischen Namen „Carsus“ zurück, dieser wiederum auf die indogermanische Bezeichnung „Karus“ für Stein oder Fels. Das Karbonat- bzw. Karstplateau Westsloweniens besteht überwiegend aus Kalk- und Dolomitgestein, das in der Zeit der Trias, des Juras und der Kreide, d. h. vor 252 – 66 Mio. Jahren vornehmlich in flachmarinem Milieu gebildet wurde.

[1] https://de.wikipedia.org/wiki/Slowenien


Geologische Karte von Slowenien
1 : 1 000 000
GeoZS
Exkursion-
strecke
Jesenice
Tolmin
Bovec
Ljubljana
Postojna
Skocjan

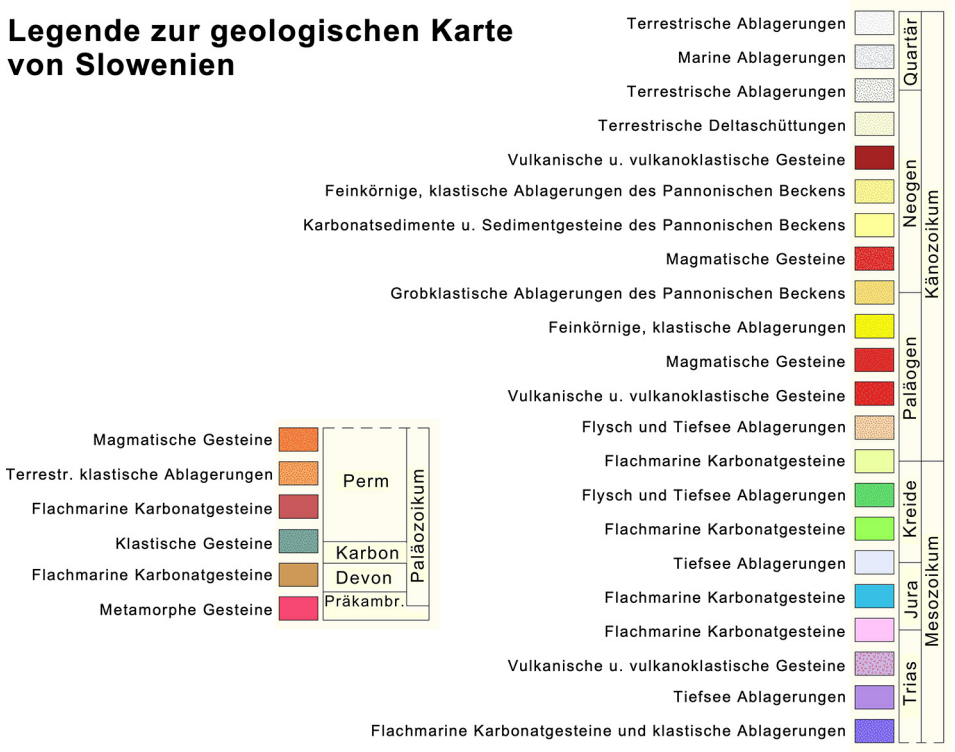


Abb. 2: Geologie von Slowenien. Westslowenien wird aus Karbonatgesteinen von Trias, Jura und Kreide aufgebaut (Slovene Research Agency, Program Regional Geology, GeoZS archive, Bavec et al. 2013).

Fig. 2: Geology of Slovenia. Western Slovenia consists of Triassic, Jurassic and Cretaceous carbonate rocks (Slovene Research Agency, Program Regional Geology, GeoZS archive, Bavec et al. 2013).

Dieser Sedimentationsraum, die sogenannte Adriatisch-Dinarische Karbonatplattform, war mit seiner flachmarinen Paläogeographie über Jahrmillionen äußerst konstant und Teil der nördlichen Adriatischen Platte, die wiederum ursprünglich Teil der Afrikanischen Platte war (Abb. 3). Die klassische Karstregion als der nordwestlichste Teil der Äußeren Dinarischen Alpen ist heute strukturell eine NW–SE orientierte Großfalte, die durch zahlreiche steil stehende Störungen mit Blattverschiebungscharakter in kleinere tektonische Blöcke zerlegt ist (Placer 2008, Korbar 2009, Jurkovšek et al. 2016). Diese Blattverschiebungen spielen eine große Rolle bei der Entwicklung der von uns besuchten Höhlen. Die Karte lässt erkennen, dass es sich hierbei vornehmlich um rechtsseitige (dextrale) Blattverschiebungen handelt.

2.1 Geologische Entwicklung

Von der Unteren bis Mittleren Trias wurden flachmarin gebildete Kalke in diesem ausgedehnten Sedimentationsraum abgelagert. In der oberen Mittleren Trias zerbrach das Gebiet entlang von Störungen in tektonische Blöcke, die z. T. unter tiefer marinen, z. T. unter festländischen Einfluss gerieten. Bis zur Oberen Trias war Zentralslowenien von tieferem Meer bedeckt (Innere Dinariden). Das Gebiet nördlich davon war während der Oberen Trias flachmarin; es wurden anfänglich Plattenkalke, später mehrere 100 Meter mächtige reine Bank- und Massenkalke, die späteren Dachsteinkalke, sedimentiert.

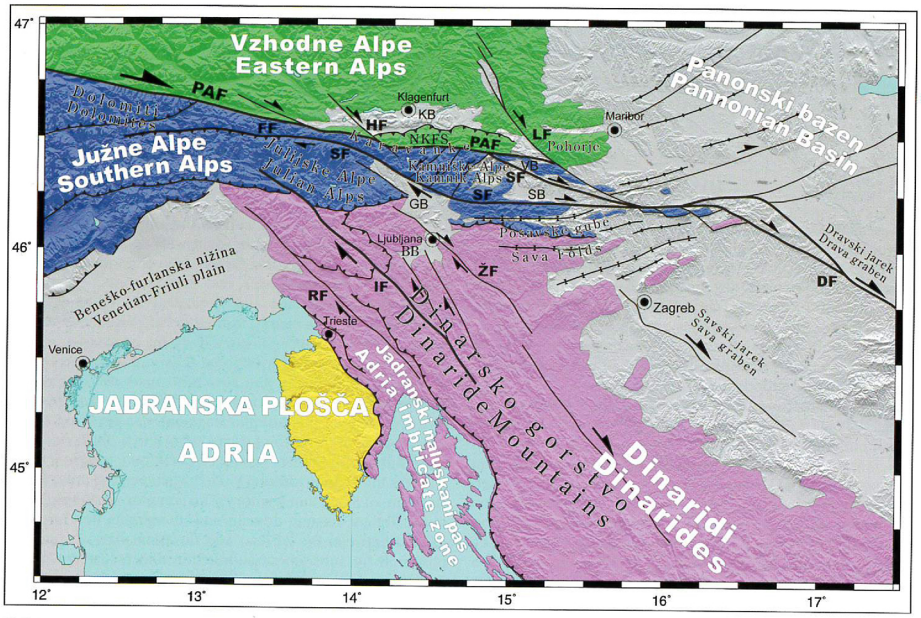


Abb. 3: Geologisch-tektonische Übersichtskarte mit Lage der Haupt-Störungszonen (Vrabec & Fodor 2006).

Fig. 3: Geological-tectonic overview map with location of the main fault zones (Vrabec & Fodor 2006).

Im flachmarinen Bereich der heutigen Nordkarawanken wurden während der Mittleren und Oberen Trias Karbonatgesteine abgelagert, in denen die bekannten Blei- und Zinkvererzungen entstanden (Cerny 1989; vgl. Abschnitt 7.5). Südlich des Slowenischen Beckens wurden ebenfalls Flachwasserkalke sedimentiert, die später meist in Dolomit umgewandelt wurden. Eine Paläoverkarstung dieser eisenhaltigen Karbonatgesteine führte zu deren Rotfärbung (Seemann 2000).

Der Zentralteil Sloweniens geriet im Jura unter eine tiefere Meeresbedeckung und es lagerten sich Plattenkalke mit Hornsteinen, Tonsteinen und Mergel ab. Südlich dieses Bereichs befand

sich ein großes Flachwasserplateau (Kabonatplattform), was uns Flachwasserkalke anzeigen. In der Kreide erfolgte im Bereich der heutigen Südalpen und von Zentralslowenien wieder eine tiefere Meeresbedeckung mit entsprechender Sedimentation. Anfänglich entstanden grüne Flyschmergel und Sandsteine, später rote Mergel und Mergelkalksteine. Diese wurden später im Bereich der heutigen Südalpen erodiert. Die südlichen Teile Sloweniens waren in der Kreide von Flachmeer bedeckt, dort lagerten sich mächtige, geschichtete Plattenkalke ab. Am Ende der Kreide war der größte Teil des slowenischen und kroatischen Istriens Festlandsgebiet, die Kalksteine waren somit der übertägigen Verwitterung ausgesetzt. Eine weitere Meerestransgression führte erneut zur Sedimentation von Kalksteinen (Seemann 2000, Vlahović et al. 2002).

Im Anschluss setzte eine lange Festlandsperiode bis in das Oligozän ein (Abb. 2, Legende). Im Oligozän (33,9 – 23 Mio. Jahre) begann die Hebung der östlichen Alpen, hier speziell in Folge der Subduktion der Adriatischen unter die Eurasische Platte, was intensive Falten-, Überschiebungs- und Störungstektonik zur Folge hatte (Abb. 3, 4, 5 und 6).

Abb. 4: Auch in Massenkalkserien können z. B. durch Wassertemperatur-bedingte Sedimentationsunterbrechungen in der Karbonatproduktion diskrete Schichtgefüge entstehen. Je nach späterer tektonischer Einengungsrichtung können diese auch als Bewegungsbahnen aktiviert werden. Lokalität: Skocjanske Jame. Foto: Wolfgang Werner.

Fig. 4: Discrete layered structures can also develop in massive limestone series, for example due to water temperature-related sedimentation interruptions in carbonate production. Depending on the later tectonic constriction direction, these structures can be activated as movement paths also. Locality: Skocjanske Jame. Photo: Wolfgang Werner.

Im Pliozän, d. h. vor 5,3 – 2,6 Mio. Jahren, kam es wegen der langanhaltenden Hebung von Kalk- und Dolomitgesteinsgebieten zu einer ausgeprägten Verkarstung, zur Bildung einer Dolinen- und Poljenlandschaft (Abschnitt 5.1) und zur Verlegung etlicher Flüsse unter die Erdoberfläche (Milhevc et al. 2016). Zu Anfang der Eiszeiten entstanden an langen Störungen große Eintiefungen, in denen Kiese und Sande aus den Glazialgebieten zur Ablagerung kamen.

Als Folge der Kollision der Adriatischen Platte mit Eurasia und der Heraushebung der Alpen zu Beginn des Oligozäns treffen heute in Slowenien verschiedene strukturelle Hauptelemente aufeinander (Abb. 3): Die Dinarischen Alpen, Istrien (Teil der Adriatischen Platte), die Südalpen, die Ostalpen und das Pannonische Becken. Damit verbunden ist auch eine große Anzahl von Störungs- und Kluftzonen. Dieser tektonische Vorgang hält bis heute an, so dass insbesondere im westlichen und südwestlichen Teil Sloweniens seismisch aktive Störungszonen auftreten und es in dieser Region häufig zu Erdbeben kommt (Del Ben et al. 1991)[2]. Störungs- und die zusätzlich bei der Heraushebung entwickelten Kluftzonen stellen Angriffsflächen für Verwitterung dar und sind damit Strukturen, in denen im Karbonatgestein verstärkt Verkarstung auftritt.

Abb. 5: Bei alpinotyper Einengungs- bzw. Deckentektonik entstehen, flache, schaufelförmige Überschiebungsbahnen mit steiler stehenden Begleitelementen. Im Bild: Überschiebung in Massenkalken. Foto: Wolfgang Werner.

Fig. 5: During alpinotype compression tectonics, flat, shovel-shaped overthrusts with accompanying high-angle elements were formed. In the picture: Overthrust in bedded limestones. Photo: Wolfgang Werner.

[2]In besonderem Maße betroffen ist beispielsweise der Raum Bovec, dazu https://www.volcanodiscovery.com/de/ort/8642/erdbeben/bovec.html

Abb. 6: Schaufelförmige Überschiebungsfläche in Bankkalken. Es ist zu erkennen, dass die Bankkalke der aufgeschobenen Scholle schwach verfaltet wurden. Foto: Wolfgang Werner.

Fig. 6: Listric overthrust in bedded limestones. It can be seen that the limestones of the overthrust slab have been slightly folded. Photo: Wolfgang Werner.

2.2 Strukturgeologie

Nachfolgend sollen die strukturgeologischen Elemente betrachtet werden, welche für die Entwicklung, heutige Geometrie und beeindruckende Dimensionierung der Karsthöhlen Sloweniens verantwortlich sind.

In der zeitlichen Reihenfolge der geologischen Entwicklung sind zu nennen:

(1a) Schichtfugen und Gesteinswechsel (meist gekennzeichnet durch Zu- oder Abnahme von Tonmineralen) (Abb. 4) und **(1b)** Fazieswechsel, z. B. von Bankkalken zu Riffkalken.

(2) Überschiebungsbahnen, entstanden im Zuge der alpinotypen Einengungstektonik (Abb. 5).

(3) Steilstehende Blattverschiebungen, also Horizontalverschiebungen mit links- oder rechtsseitigen Relativbewegungen an den (meist sehr tiefreichenden) Störungen. Hierbei kam es auch zur Bildung von steilstehenden, offenen Spalten.

(4) Kluftsysteme, ebenfalls überwiegend steil stehend und bevorzugt in Richtung der älteren Blattverschiebungen orientiert, jedoch auch orthogonal dazu. Klüfte entstehen bei tektonischer Beanspruchung, insbesondere bei Heraushebung von Gesteinsstapeln unter dominant dehnender/weitender Tektonik. An ihnen finden i. d. R. keine oder nur geringe Relativbewegungen statt.

Die nachfolgenden Abbildungen, entstanden bei der Exkursion, geben jeweils Beispiele für diese vier strukturgeologischen Entwicklungsschritte.

3 Klima

An der slowenischen Adria und im dahinter liegenden Karstgebiet, einem schmalen Streifen im Südwesten Sloweniens, herrscht vorwiegend ein mediterranes Klima mit sonnigen und warmen Monaten zwischen Mitte Mai und Mitte September. Herbst und Winter sind sehr mild. Die Jahresdurchschnittstemperatur beträgt 13-14°C. In den Mittel- und Hochgebirgen im Nordwesten (Julische Alpen, Kamniker Alpen) sind die Sommermonate mäßig warm und die Wintermonate sehr kalt. Ab Mitte Dezember bis Anfang April gibt es meist eine geschlossene Schneedecke. Die Durchschnittstemperatur beträgt hier 7°C. Im übrigen Teil Sloweniens, ausgenommen in der Pannonischen Tiefebene, herrscht Kontinentalklima mit angenehm warmen Sommermonaten und vereinzelt kalten Wintermonaten ähnlich Süddeutschland.

Vorwiegend in den Wintermonaten können starke, böige Fallwinde aus dem Norden, die sogenannte Bora, mit extrem hohen Geschwindigkeiten von bis zu 250 km/h auftreten, die im Winter auch mehrere Tage oder Wochen anhalten können. In den weiten Bereichen Sloweniens, die vor Jahren noch unbewaldet waren, wurde durch die Bora Erdboden weggefegt und der darunter liegende Fels, das Karbonatgestein, bloßgelegt und der Verwitterung (Verkarstung) ungeschützt ausgesetzt.

Abbildung 7 zeigt die mittlere jährliche Niederschlagsverteilung (in mm/Jahr) in Slowenien. Die höchsten Niederschläge von 1500 bis über 3000 mm/Jahr (lokal auch 4000 mmm/Jahr) treten im Westen, somit vorzugsweise im klassischen Karstplateau auf, also in den Gebieten,

in denen Karbonatgesteine vorliegen. Im Vergleich dazu beträgt die mittlere jährliche Niederschlagsmenge in Freiburg „nur“ knapp 1000 mm. Die hohen Niederschlagsmengen in Westslowenien führen zusammen mit den warmen Temperaturen zu einer intensiven Verkarstung des Karbonatgesteins, wobei die erosive Wirkung reißender Bäche und Flüsse im Gebirge diesen Vorgang unterstützt.

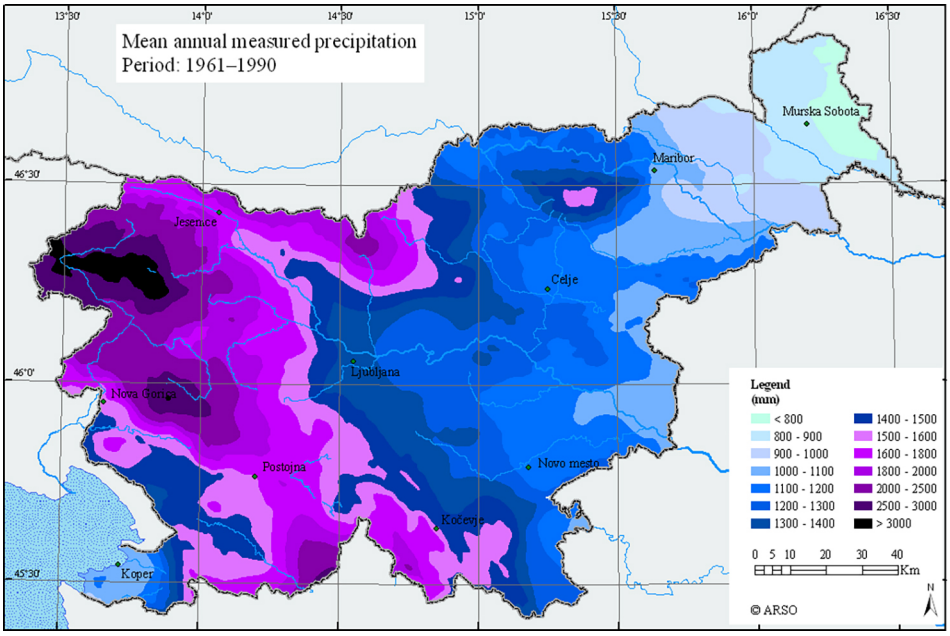


Abb. 7: Mittlere jährliche Niederschlagsverteilung in Slowenien für den Zeitraum 1961-1990. Quelle: https://gis.arso.gov.si (letzter Zugriff: 25.9.2024)

Fig. 7: Mean annual precipitation in Slovenia for the period 1961-1990. Source: https://gis.arso.gov.si (last access: 25 September 2024)

4 Gewässernetz Sloweniens

Das slowenische Fließgewässersystem ist in zwei große Einzugsgebiete gegliedert (Abb. 8). Zur Adria werden im Mittel circa 170 m³/s und über die Donau zum Schwarzen Meer netto 420 m³/s (gesamt 840 m³/s) abgeführt (Bat et al. 2004). Das deutlich kleinere Einzugsgebiet der Adria liefert somit bei einem Flächenanteil von nur 19 % über 40 % des Abflusses (vgl. Abschnitt 3). Von den drei größten Flüssen Drava und Sava (mittlerer Abfluss je >300 m³/s) sowie Mura (165 m³/s) entspringt nur die Sava in Slowenien, alle drei entwässern in das Donau-System (Bat et al. 2004).

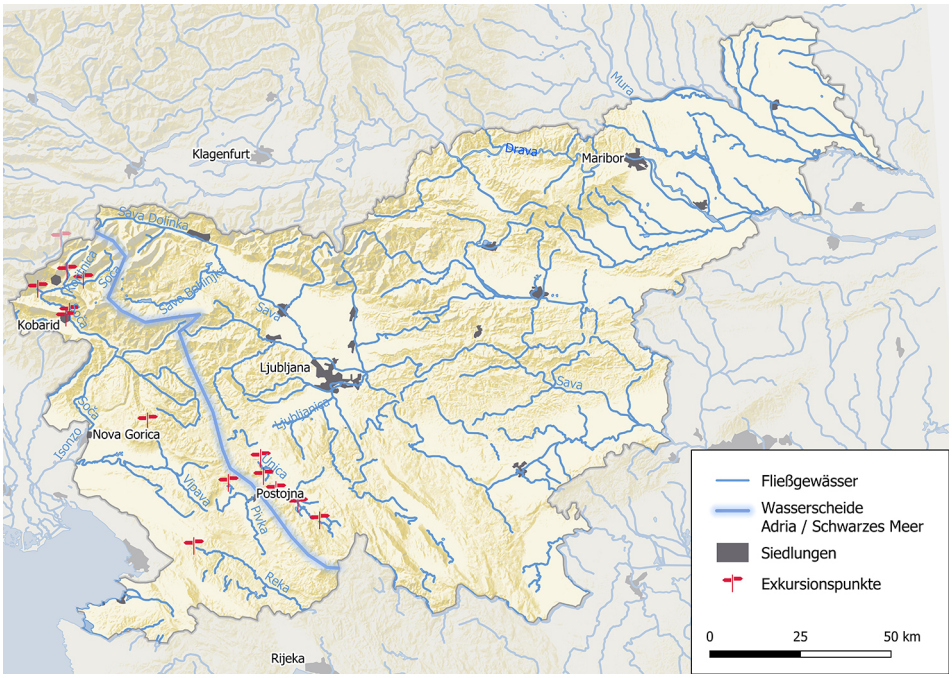


Abb. 8: Das slowenische Gewässersystem und die ungefähre Lage der Wasserscheide Adria/Schwarzes Meer. Kartengrundlage: Surveying and Mapping Authority of the Republic of Slovenia (https://ipi.eprostor.gov.si, letzter Zugriff: 28.4.2024).

Fig. 8: The Slovenian river system and the approximate location of the Adriatic/Black Sea watershed. Data base: Surveying and Mapping Authority of the Republic of Slovenia (https://ipi.eprostor.gov.si, last access: 28 April 2024).

Neben dem Flusssystem der Ljubljanica (siehe Abschnitt 7.1) ist sicher der Fluss Reka eine Besonderheit: Die Reka versinkt nach 46 km oberirdischer Fließstrecke im Höhlensystem der Škocjanske Jame (siehe Abschnitt 7.2) und tritt nach 35 km Laufstrecke in mehr als 300 m Tiefe als Quelle des Timavo in der Bucht von Triest aus, wo sie in die Adria mündet (Park Škocjanske Jame 2013).

5 Verkarstung und Karstformen

5.1 Der Prozess der Verkarstung

Die Verkarstung von Karbonatgestein (Kalk, Dolomit) hängt direkt mit dem Kohlenstoffzyklus zusammen. Die Lösung von Kalk, also Kalziumkarbonat ($CaCO_3$), in Wasser (H_2O), in dem

Kohlendioxid (CO_2) gelöst enthalten ist, lässt sich chemisch folgendermaßen beschreiben (z. B. White 2015):

$$CaCO_3 + CO_2 + H_2O \rightleftharpoons Ca^{2+} + 2HCO_3^- \quad (1)$$

wobei die Gleichung: $CO_2 + H_2O = H^+ + HCO_3^-$ den Bezug zum pH-Wert erklärt, da $pH = -\log(H^+)$.

Für Dolomit, $CaMg(CO_3)_2$, erfolgt der Lösungsvorgang deutlich langsamer; es gilt entsprechend:

$$CaMg(CO_3)_2 + 2CO_2 + 2H_2O \rightleftharpoons Ca^{2+} + Mg^{2+} + 4HCO_3^- \quad (2)$$

Wasser wird durch die Lösung von Kalziumkarbonatgestein (Kalkstein) an Kalzium (Ca^{2+}) und Hydrogenkarbonat (HCO_3^-) angereichert, wie auf der rechten Seite von Gleichung 1 ersichtlich. Wasser in einem Karbonatgestein gehört daher i.d.R. zum Ca-HCO_3-Wassertyp. Dieser Vorgang der Lösung von Karbonatgestein (Gleichung 1) ist reversibel: Wenn Wasser mit Kalziumkarbonat gesättigt oder übersättigt ist, kann dieses wiederum ausfallen und es bilden sich Sinterablagerungen oder Tropfsteine (Abb. 9). Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn der CO_2-Partialdruck oder der CO_2-Gehalt im Wasser abnimmt.

Für einen bestimmten CO_2-Partialdruck im Wasser sind die Gleichgewichtskonzentrationen des gelösten Kalzits sowie der pH-Wert des Wassers fest vorgegeben. Zudem besteht eine Temperatur- und Druckabhängigkeit der Reaktion (Gleichung 1). Die folgenden Angaben beziehen sich auf oberflächennahe Bedingungen, d. h. auf Wasser mit einer Temperatur von 25°C und 1 bar Druck: Beispielsweise kann Wasser, das im Gleichgewicht mit atmosphärischem CO_2-Druck ($\log pCO_2 = -3{,}5$) steht, nur 20 mg/l Kalzium (Ca^{2+}) aufnehmen, dann ist es mit Kalzit gesättigt und der pH-Wert des Wassers stellt sich auf pH = 8,3 ein. Die Bodenluft hat typischerweise infolge der Zersetzung organischer Substanz einen deutlich höheren CO_2-Druck ($\log pCO_2 = -2{,}0$). Das CO_2 senkt den pH-Wert des Wassers im Untergrund (pH = 7,3) und erhöht die Kalzitlöslichkeit bis zur Sättigung auf 66 mg/l Ca^{2+} im Wasser. Somit kann Wasser, das an der Erdoberfläche über Kalkstein fließt, nur bis zu ca. 20 mg/l Kalzium (Ca^{2+}) aufnehmen. Sickert dieses Wasser über Klüfte und Spalten in den Untergrund, so kann es mehr Kalzium aufnehmen, bis es gesättigt ist, da der CO_2-Druck in der Bodenluft höher ist. Die Lösung des Karbonatgesteins ist somit etwa dreimal so hoch wie an der Erdoberfläche. Die Verkarstung wird also durch den hohen CO_2-Druck in der Bodenluft befördert. Gelangt derart Kalzium-gesättigtes Wasser auf seinem weiteren Weg in den Untergrund in eine Höhle, die atmosphärischen Kontakt zur Erdoberfläche hat, so ist das in die Höhle tropfende Wasser unvermittelt wieder einem deutlich niedrigeren CO_2-Druck ausgesetzt und das Wasser ist

dadurch bezüglich Kalzit übersättigt, was zur Folge hat, dass Kalzit ausfällt. Es bilden sich Tropfsteine oder Kalzitrasen (Abb. 9).

Abb. 9: Ausfällung von Kalzit aus einem mit Kalziumkarbonat übersättigten Wasser führen zur Bildung von Tropfsteinen an der Felswand der Vranja-Höhle. Foto: Ingrid Stober.

Fig. 9: Precipitation of calcite from water supersaturated with calcium carbonate has lead to the formation of stalactites on a rock face of Vranja Cave. Photo: Ingrid Stober.

Die Beziehung zwischen CO_2-Druck und Lösung von Kalzit bis zum Erreichen der Gleichgewichtskonzentration (Gleichung 1) ist allerdings nicht linear. Die Mischung verschiedener Wässer muss nicht notwendigerweise zu zusätzlicher Kalzitlösung führen (Bögli 1964), sondern es können auch umgekehrte Effekte auftreten (White 2015). Wie oben erwähnt, gilt Entsprechendes für die Lösung von Dolomit (Gleichung 2) oder auch für unreinen Kalk, allerdings laufen diese Reaktionen deutlich langsamer ab.

5.2 Karsthydrologischer Formenschatz

Zur Verkarstung gehören sowohl unterirdische Geländeformen, wie z. T. sehr große Karsthöhlen, als auch Oberflächenkarst, wie Rillen oder Karren. Diese Geländeformen sind vorwiegend durch Lösung von Gestein mit hohem Kalziumkarbonat-Gehalt ($CaCO_3$), aber auch durch die Wiederausfällung von Kalzit entstanden. Die Voraussetzungen für eine Verkarstung und Intensität der Verkarstung hängen ab von

- dem Vorliegen leicht löslichen Gesteins, möglichst reiner Kalksteine (Kalziumkarbonat: $CaCO_3$) (Abschnitt 5.1),
- der Höhe der Niederschläge; im Exkursionsgebiet: 1500 bis über 3000 mm/Jahr (Abschnitt 3),
- den tektonisch angelegten Strukturen (Störungen, Klüfte) als Angriffsflächen für die Verkarstung sowie ständige Reaktivierung oder Neubildung dieser Strukturen durch Seismizität bzw. Erdbeben (Abschnitt 2.2),
- der Ausprägung des Reliefs. Ein starkes Relief befördert bei hohen Niederschlägen die Erosion durch übertägige und unterirdische Flüsse oder Bachläufe und damit eine Freilegung neuer Angriffsflächen für die Verkarstung. Im Exkursionsgebiet gibt es zahlreiche reißende Flüsse.

Die Verkarstung in Slowenien setzte spätestens im Pliozän, also vor 5,3 – 2,6 Millionen Jahren ein, teilweise aber auch bereits am Ende der Kreidezeit (vor 66 Mio. Jahren; Abschnitt 2.1). Damit stand ein äußerst langer Zeitraum zur Verfügung, um die unter- und überirdischen Geländeformen und damit den karsthydrologischen Formenschatz zu schaffen. In diesen Zeitraum fallen auch die Eiszeitalter, die u. a. durch Gletscherbewegungen entlang von mächtigen Störungszonen zu großen erosiven Eintiefungen führten oder durch Frostsprengung mit Auflockerung des festen Gesteinsverbands neue Angriffsflächen für die Verkarstung bereitstellten.

Starke Verkarstung kommt überwiegend im Westen und Süden Sloweniens vor (Abb. 10), wobei extrem starke Verkarstung an die Karbonatgesteine des Jura und der Kreide, d. h. an relativ reine Kalksteine gebunden ist. Eine schwächere Verkarstung ist eher in Karbonatgesteinen des Unterjura und der Obertrias, d. h. in Karbonatgesteinen mit Dolomit- oder Mergelkalksteinvorkommen zu finden. Eine Ausnahme stellt der Nordwesten dar. Hier verstärken und überprägen die extrem hohen Niederschläge und das starke Relief des Gebirges die rein geologisch bedingten Einflussfaktoren. Es finden sich häufig tief in den Untergrund eingeschnittene Bäche und Flüsse, bei denen sich ihre erosive Kraft durch die gleichzeitige chemische Lösung besser entfalten konnte. Abgerundete steile Talflanken sind landschaftsprägend (siehe Abschnitt 7.4, Abb. 42).

Durch die Verkarstung ist das Karbonatgestein stellenweise oder großflächig extrem durchlässig. Tiefgründig entwickelte Karstlandschaften können daher trotz reichlicher und teilweise hoher Niederschlagsmengen völlig trockene Böden aufweisen, da das Niederschlagswasser in den

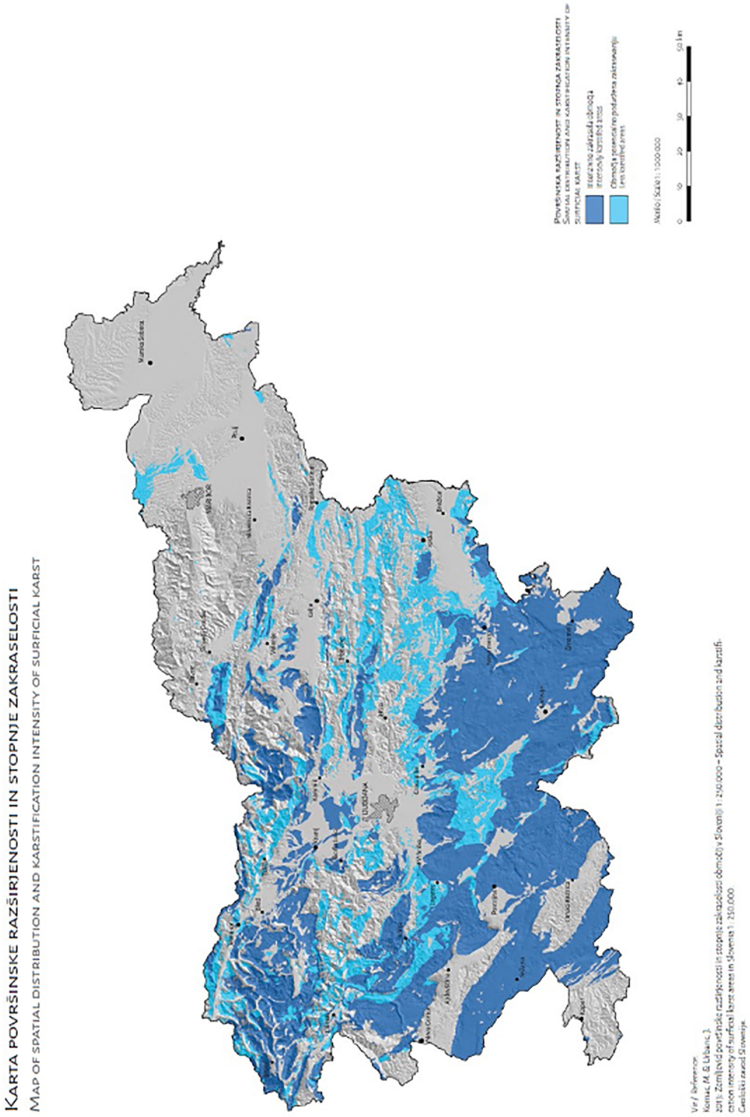


Abb. 10: Grad der Verkarstung von Karbonatgesteinen in Slowenien (dunkelblau: sehr stark, hellblau: schwächere Verkarstung, grau: keine oder kaum Verkarstung) (Komac & Urbanc 2013).

Fig. 10: Degree of karstification of carbonate rocks in Slovenia (dark blue: very strong, light blue: weaker karstification, gray: no or scarcely karstification) (Komac & Urbanc 2013).

hochdurchlässigen, von Röhrensystemen durchzogenen Untergrund rasch in größere Tiefen einsickert, bis es den typischerweise tief liegenden Grundwasserspiegel erreicht. Die Schüttungsrate von Quellaustritten kann wegen der hohen Durchlässigkeit des Untergrunds sehr hoch sein, ist allerdings großen witterungsbedingten Schwankungen unterworfen (Zini et al. 2010). Selbst große Flüsse können unvermittelt im Untergrund verschwinden und an anderer Stelle wieder zu Tage treten (z. B. Abb. 22).

Durch Markierungs- oder Tracerversuche hat man insbesondere in den 1970er Jahren versucht, den Verlauf von Gewässernetzen zu erkunden, unterirdische Fließgeschwindigkeiten zu ermitteln und Einzugsgebiete von Gewässern abzugrenzen (Gospodarič & Zötl 1976). In den tiefgründig entwickelten Karstlandschaften Sloweniens befinden sich unterirdische Flusssysteme bzw. Gewässersysteme, die gelegentlich das Nachsacken hangender Schichten mitverursachen, so dass Dolinen oder sonstige Hohlformen entstehen. Eine derartige Landschaft ist daher aus geologischer Sicht sehr dynamisch und ständigen Änderungen unterworfen. Hinzu kommt, dass in Karstgebieten die Wasserstände in Flüssen sehr rasch und extrem stark wechseln können, besonders drastisch im westlichen Slowenien mit seinen hohen Niederschlägen (Abschnitt 3). Ausgedehnte Überflutungen sind daher häufig.

Die zahlreichen Lösungs- und Fällungsprozesse in Karstgebieten führen zu einem völlig neuen morphologischen Formenschatz an der Erdoberfläche, aber auch zu Strukturen und Morphologien im Untergrund, die in anderen geologischen Formationen nicht oder kaum anzutreffen sind. Es hat sich daher ein eigener karsthydrologischer Formenschatz entwickelt. Zu diesem karsthydrologischen Formenschatz gehören:

- **Karstquellen**: Das sind Wasseraustrittsorte aus einem verkarsteten Karbonatgestein. Sie stellen unterirdische Entwässerungen eines größeren Gebietes dar. Die Karstquellen haben zeitweise eine sehr große, zeitweise aber auch eine geringe Schüttung (Abb. 21). Es besteht eine starke Abhängigkeit von der Niederschlagshöhe.
- **Karren (oder Schratten)**: Das sind Lösungserscheinungen wie Rillen oder Rinnen an der Oberfläche des Karbonatgesteins.
- **Tropfsteine, Sinterbecken**: Es handelt sich hierbei um Ausfällung von Kalzit aus übersättigtem Wasser (Abb. 9 und 32).
- **Karsthöhlen**: Diese teilweise gewaltigen Hohlräume sind über Millionen von Jahren durch Lösung des Karbonatgesteins entstanden. Erosive Kräfte von Flüssen – auch unterirdischen –, das Vorhandensein von Störungen oder Klüften haben zusätzlich zu ihrer Entstehung und Ausbildung beigetragen (z. B. Abb. 34).
- **Ponore (Schlucklöcher, Schwinden)**: Es handelt sich hierbei um eine Öffnung in der Geländeoberfläche, an der ein fließendes oder stehendes Gewässer abfließt und unterirdisch weiterfließt. Teilweise sind Ponore auch nur bei Hochwasser aktiv und können sehr große Wassermassen aufnehmen (Abb. 11, 27).

- **Poljen** sind oft quadratkilometergroße, häufig allseits geschlossene Hohlformen im Karst mit zumeist recht ebenem Boden, stellenweise steiler Umrahmung und deutlichem Hangknick. Sie besitzen oft einen unterirdischen Abfluss. Sie können trocken liegen, aber auch ganzjährig oder zeitweise durchflossen oder geflutet sein (Abb. 16, 25). An ihrem Rand befinden sich häufig Ponore.
- **Dolinen**: Dolinen sind schlot-, trichter- oder schüsselförmige Senken von meist rundem oder elliptischem Grundriss (Abb. 12, 31). Sie können Durchmesser von nur wenigen Dezimetern bis zu einigen Kilometern aufweisen (siehe Abschnitt 7.3).
- **Trockentäler, Sickerflüsse**: Trockentäler sind Täler mit episodischem Wasserfluss. Bei dem nur zeitweise vorhandenen Fluss oder Bach spricht man von einem Sickerfluss. Aber auch größere Flüsse können unmittelbar verschwinden.

Abb. 11: Ponor bei Laze im Planinsko Polje, in dem ein Teil der Unica verschwindet. Foto: Ingrid Stober.

Fig. 11: Ponor near Laze in Planinsko Polje, where part of the Unica's water disappears. Photo: Ingrid Stober.

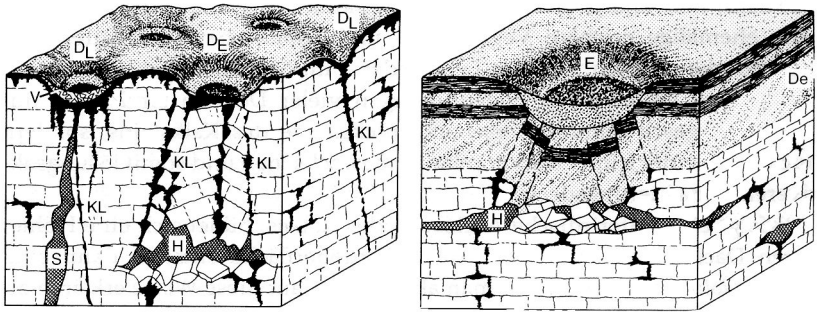


Abb. 12: Schematische Darstellung von Dolinen (Leser 1997).

Fig. 12: Schematic illustration of dolines (Leser 1997).

6 Erkenntnis- und Forschungsgeschichte

Mit über 7000 registrierten und vermessenen Höhlen und zahlreichen unentdeckten Höhlen zählt Slowenien zu den höhlenreichsten Gebieten Europas. Die Karst- und Höhlenforschung nahm dort ihren Anfang (dazu z. B. Mattes 2012, 2013). 1689 verfasste der Universalgelehrte und Topograph Johann Weichard von Valvasor das große Werk „Ehre Deß Hertzogthums Crain". Es lohnt sich, ein paar Abschnitte zu zitieren. Der Kenntnisstand war erstaunlich groß. Erste Erkundigungen in den Karsthöhlen waren abenteuerlich und gefährlich. Die mutmaßlich große wissenschaftliche Bedeutung des slowenischen Karsts wurde gesehen:

> Ich habe in unterschiedlichen Ländern und Königreichen, nicht allein in Europa, sondern auch in Africa, viel seltsam-wunderliche Grotten Selber gesehn; aber in Warheit nirgends so seltene, noch Verwunderung-machende, als in diesem meinem Vaterlande. Diese seynd biß anhero wenig bekand gewest: weil Niemand davon geschrieben, auch selten hier zu Lande [...] (S. 242)

Zum Innerkrain (Karst und Poik):

> Die Reka entspringt in Ober-Poykh und fällt bei S. Canzian unter der Stadt in die Erden[3]. Machet aber viel Variationen und seltsame Abwechslungen. Denn auf der anderen Seiten fliesst sie gleich wieder heraus; kommt aber kaum eines Steinwurffs weit, als sie wiederum zu einem Felsen-Loch kommt und aus der Gegen-Seiten deß Felsens wieder herauslaufft. Dieser Fels gleicht einem recht pyramidalisch-aufgespitzten Berglein und ist doch gleichwol höher als einiger Kirch-Thurn. Kaum hat sich dieser Umsattler, unbeständiger Erd-Kriecher

[3]Hier handelt es sich um die Reka bei Škocjan (S. Canzian).

> und Unter-Taucher, dieser Fluß, sag ich, zween Steinwürffe weit über der Erde gedultet, da will er wieder unter oder in ihr seyn, flutet abermal zu einem Felsen hinein in die Erde und reiset unter ihrer Decke vier Meilwegs in der Karst. Alsdann bricht er zwischen Tywein und S. Johannis durch einen Felsen aus sieben Löchern hervor, gleich als hette die Erde ihn zur Danckbarkeit der Anvertrauung reichlich begabt und mit einem ansehnlich-vermehrtem Geleit wieder beurlauben und erlassen wollen (S. 275).
>
> Allein es ist auch noch ein andrer Fluß eben dieses Namens Reka, der deß vorigen Bruder, aber ganz antipathisch. Dieser Fluß entspringt auch am Poig bey Prewald und tertheilet sich hernach in zween Arme; deren einer, und zwar der grösseste, bey dem Dorffe Velike Otog sich in die Erde verlaufft. Deßgleichen thut auch der andere Arm by dem Dorff Klein-Otog [Mali Otok bei Postojna]. [...] Beyde Arme dieses Wassers wie auch der Poykh vereinigen sich miteinander gleich im Berge: und auf der andren Seiten deß Bergs, als bey Klein-Häusel und Haaßberg kommen sie an zweyen Orten wieder heraus; fließen gleich unterhalb zusammen und werden nach geschehener solcher Vereinigung die Untz genannt[4]. Welche Untz nicht übrig weit laufft, da sie gleichfalls zur Erden eingeht in ein Loch. Und über zwo Meilwegs kommen wiedrum an zweyen Orten zween Zweige oder Arme von ihr heraus, nachdem sie sich inwendig zertheilet hat, weil sie an stat eines zween Ausgänge und Löcher gefunden (S. 276)
>
> So begehren sie auch allerdings nicht in einerley Meer ihren Ausgang oder Ausfluß nehmen: sintemal die erste dem Adriatischen [die Reka], die andre [die Rak] dem Schwarzen Meer zuwandert (S. 277).

Den Weg des Wassers vom Ausgang des Cerkniško Polje durch den Rakov Škocjan bis zur Tkalca Jama bei der Kapelle St. Kanzian[5] beschreibt Von Valvasor im vierten Buch „Von den Natur-Raritäten dieses Landes“:

> Eine halbe Meile vom Zircknnitzer See und eine viertheil Meil vom Dorf Utz [Unec] steht mitten in der Wildniß die Kirche S. Cantiani [...] an einem recht seltenem und wunderbarem Ort. Der Fluß Jesero, der aus einem Felsen hervor laufft, kommt aus dem Zircknitzer See. Denn selbige See fließt zu einem Loch, Karlauza [Karlovica, Ponore, Abb. 15] genannt, hinein und zu diesem Loch hingegen wieder heraus. Über eine halbvierthel Meile verschlupfft er sich in den Felsen, das ist in einem ziemlich hohen Berg; hernach, einen guten Musketen-Schuß unter dem Berge, durch lauter Felsen und Grotten. Alsdann macht er sich auf der andren Seiten zu solchem tuncklem Berg-Quartier wiederum heraus und laufft wieder einen starken Musqueten-Schuß weit; allwo er [...] zu einer Grotten einfliesst, [...].

[4] Gemeint ist der unterirdische Zusammenfluss von Pivka und Rak, die als Unica im Planinsko Polje zu Tage treten und sich mit der Malenščica vereinigen (vgl. Abb. 23).

[5] Gemeint ist die Kapelle im Rakov Škocjan.

> Durch selbige Grotte passirt er hernach in eine kleinere Grotten; und also weiter fort hinein: wohin aber, ist nicht zu wissen; weil es auch nicht möglich, weiter zu fahren und ihm mit dem Schifflein zu folgen. Biß hieher bin Ich Selber auf einem kleinen Fischer-Schifflein durch den Berg biß in diese letzt-gedachte Grotta gekommen. Durch den Berg fährt sichs gar gut und unverdrießlich: weil es auch nicht zu finster darin: angemerkt das Loch oder die Grotte [...] sehr hoch und breit wie gleichsam ein Schwibbogen oder Gewelbe von einem Felsen-Stück (S. 481).

Und an anderer Stelle:

> Bey S. Kozian[5] [...] zwischen Circkniz und Adelsperg schauet man gleichfalls in eine überaus wunderliche Höle, auf deren natürlichen Schwibbogen die Kirche steht. Unten rinnt der Fluß Jesero in die Felsen oder in die Grotta. Bißweilen, wann der Fluß groß Wasser bekommt, entsteht ein greuliches Brummen, Knallen und Krachen, als ob es donnerte, also daß sich Alles miteinander erschüttert (S. 242).

Am weitesten geht die Forschung bei den Škocjanske Jame zurück (Abschnitt 7.2). In der ersten Hälfte des 19. Jahrhundert kam es zu Problemen mit der Trinkwasserversorgung in der Stadt Triest. Dies gab den Impuls, die tiefen Schächte und Höhlen von Škocjan zu untersuchen. Dabei folgten die Forscher dem unterirdischen Lauf der Reka. Im Jahre 1839 begann Ivan Svetina, ein Brunnenmeister aus Triest, mit den Erkundungen der Höhlen. Im Jahre 1840 schaffte er es bis zum dritten Wasserfall. Dieser ist etwa 150 m vom Ponor des Großen Tals (Velika Dolina) entfernt (Kranjc 2002, Beltram & Martinčič 2013).

Als Begründer der Speläologie als Wissenschaft gilt Adolf Schmidl (Schmidl 1853, 1854, Trontelj 1998). In den Jahren 1851 und 1852 erkundete Schmidl mit einer von Ivan Rudolf angeführten Gruppe von Bergmännern aus Idrija das Höhlensystem Škocjan bis zum vierten Wasserfall, möglicherweise sogar bis zum sechsten Wasserfall. Doch setzte die plötzlich anschwellende Reka seiner Erkundung ein Ende. Ihre Ausrüstung – inklusive Boote – wurden von der Reka fortgerissen. Seine Erkenntnisse veröffentlichte Schmidl 1853.

Im Jahre 1884 wurde die Höhlenforscherabteilung des Deutschen und Österreichischen Alpenvereins gegründet. Noch im selben Jahr erhielt der Verein das Pachtrecht für die Höhlen. Unter der Leitung von Anton Hanke, Josip Marinitsch und Friedrich Müller sowie mit Hilfe von Einheimischen wurde systematisch mit der Höhlenforschung begonnen. Im ersten Jahr konnte der sechste Wasserfall, der lange Zeit als nicht bezwingbares Hindernis galt, überwunden werden. Der vierzehnte Wasserfall im Hankekanal konnte im Jahre 1887 bezwungen werden. Im Jahre 1890 wurde die Martelhalle entdeckt. Am 5. Oktober desselben Jahres, knapp 1700 m von den letzten Ponoren entfernt, wurde das Ufer des Toten Sees erreicht. 1891 gelang Müller der Nachweis mit Uranin, dass zwischen der Reka und den Quellen des Timavo eine Verbindung besteht. Der Timavo mündet nach zwei Kilometern bei Duino in die Adria. Die letzte größere Entdeckung im Jahr 1904 war die „Stille Höhle“. Vier Einheimische entdeckten

[5] Dito.

sie, als sie von der Müllerhalle aus über eine 60 m hohe Wand kletterten. Damit war, zumindest für die damalige Zeit, die Erforschung der Höhlen beendet (Kranjc 2002, Beltram & Martinčič 2013).

Fast 100 Jahre ruhte die Höhlenforschung, bis es den slowenischen Höhlentauchern Janko Brajnik und Samo Morel 1991 gelang, den Siphon im Marchesetti-See knapp vor dem Toten See zu durchtauchen. Hinter dem Siphon entdeckten sie neue, große Gänge und unterirdische Seen. Mit dieser Entdeckung beginnt ein neues Kapitel der Höhlenforschung. Die Herausforderung liegt nun darin, entlang der unterirdischen Reka bis zu den knapp einen Kilometer entfernten durchflossenen Gängen der Kačna Jama (Schlangenschlund) vorzudringen (Kranjc 2002, Beltram & Martinčič 2013).

Die meisten archäologischen Funde in den Höhlen von Škocjan wurden von Speläologen gemacht. Erst später befassten sich auch Archäologen mit den versteckten Geheimnissen der Höhlen. Die Funde belegen, dass die Höhlen bereits seit der mittleren Steinzeit eine regionale Bedeutung hatten. Zu erwähnen sind die Funde aus der sogenannten „Fliegenhöhle" (Musja Jama): Zerbrochene Bronzegefäße und Waffen. Sie konnten auf die späte Bronzezeit datiert werden. Die Vermutung liegt nahe, dass diese Gegenstände im Zuge von religiösen Ritualen in die Höhle hineingeworfen wurden (Kranjc 2002, Beltram & Martinčič 2013).

1831 wurde in den Höhlen von Postojna das erste Höhlentier, der Schlankhalskäfer, wissenschaftlich beschrieben (Trontelj 1998). In den Höhlen von Škocjan wurde die Flora und Speläoflora intensiv untersucht. An einigen Höhleneingängen tritt eine Temperaturinversion auf, sodass sich eine Reliktflora halten kann (submediterrane neben mitteleuropäischen und alpinen Pflanzenarten; siehe auch Abschnitt 7.3).

Gegen Ende des Ersten Weltkrieges, waren die österreichischen Phosphatreserven äußerst knapp. Bei der Höhlenforschung entdeckte man, dass sich „Höhlendünger", bestehend aus Exkrementen und Resten verwester Tiere, wegen des hohen Phosphatanteils zu Düngungszwecken verwenden lässt (Willner 1920).

7 Exkursion

7.1 Flussgebiet des Rak

7.1.1 Loško Polje, Cerkniško Polje

Der erste Tag führte uns in das Flussgebiet des Rak, also des Flusses, den Valvasor 1689 so treffend beschrieben hat. Das Einzugsgebiet beginnt im Babno Polje an der Grenze nach Kroatien. Soweit das eindeutig nachvollziehbar ist, nimmt das Wasser des Rak den Weg über das Loško Polje, das Cerkniško Polje, Rakov Škocjan, das Planinsko Polje, hat davor untertage die Pivka aufgenommen, und kommt, nachdem unterirdisch noch die Logaščica zugeflossen ist, in Vrhnika in einer großen Karstquelle wieder zum Vorschein und heißt nun Ljubljanica, die in die Sava mündet.

Zum Loško Polje (Abb. 13, 14): Nach der ersten unterirdischen Passage tritt das Wasser als Mali Obrh in das Loško Polje aus und nimmt den Veliki Obrh auf. Das Polje, 6 km lang und etwa 4 km breit, liegend im Dolomit, ist wie die anderen Poljen von einem extremen Wasserhaushalt gekennzeichnet. Weite Flächen können überflutet werden, wenn die Schlucklöcher und Ponore das zufließende Wasser nicht mehr aufnehmen und abführen können. Das Relief zeigt neben den tief liegenden, häufig überfluteten und von mächtigen Lehmablagerungen gekennzeichneten Flächen mit ausgeprägtem Mikrorelief auch hügelige Strukturen, wo offensichtlich der Dolomit ansteht, mit flachgründigen Böden. Auf den sehr nährstoffreichen Auenlehmen wachsen üppige Staudenfluren, Röhrichte und Fettwiesen, auf den Rücken hingegen eher schwachwüchsige, artenreiche Pflanzengemeinschaften, die als Wiesen genutzt werden.

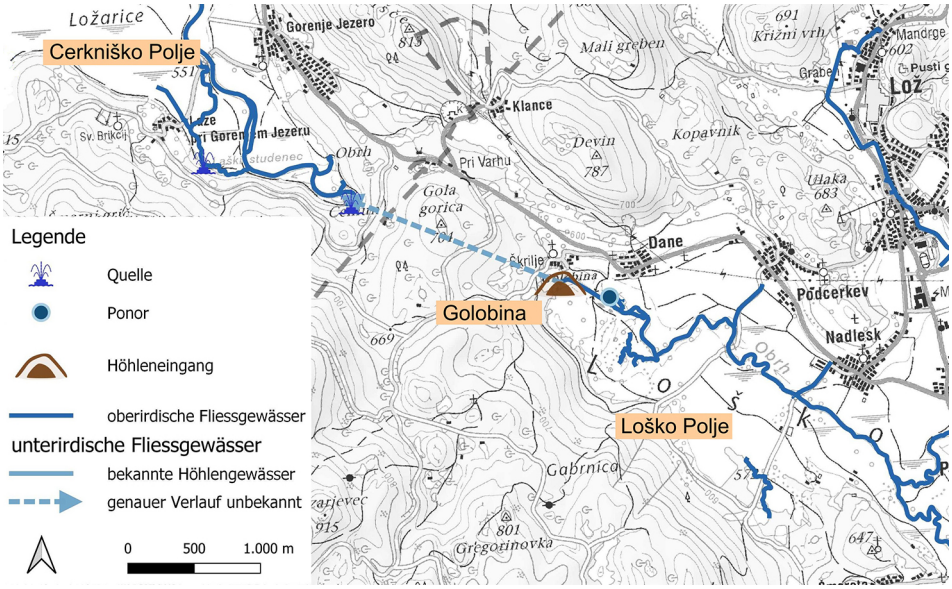


Abb. 13: Das Loško Polje im Flussgebiet des Rak. Das Wasser des Obrh verschwindet in der Golobina.

Fig. 13: Loško Polje in the Rak river basin. The water of the river Obrh disappears into the Golobina Cave.

Entlang des Obrh und auch im Gewässer gibt es zahlreiche Schlucklöcher, die bei zurückgehendem Zufluss sukzessive vom Unterstrom her ihre Funktion einstellen. Zurzeit der Exkursion lag das Bachbett vor der Golobina-Höhle trocken.

Die Golobina-Höhle stellt die Verbindung vom Loško Polje zum Cerkniško Polje dar. Doch lag der natürliche Eingang über dem Polje-Grund, wodurch es zu extremen Rückstaus kam. Von 1901 bis 1906 wurde deshalb nach den Plänen des Försters und Höhlenforschers Wilhelm Putick ein künstlicher, tiefer gelegener Zugang zu den Karstklüften geschaffen. Gitter und Rechen sollten angeschwemmtes Material zurückhalten (Kraus 1888). Das Gewässerbett zum

künstlichen Eingang ist massiv als Kanal ausgebaut, dem ein kurzer Tunnel folgt. Man kann ein ganzes Stück in die Höhle/den Tunnel einsteigen (Vorsicht, abschüssig!) und sehen, dass bei aktivem Abfluss in die Klüfte der Höhlendecke sehr viel organisches Material eingetragen wird.

Abb. 14: Der Obrh versinkt oberhalb der Golobina in zahlreichen Schlucklöchern. Im Polje haben sich mächtige nährstoffreiche Sedimente abgelagert, die bei stärkeren Abflüssen zum Teil wieder umgelagert werden. Foto: Werner Konold.

Fig. 14: Upstream the Golobina cave the river Obrh vanishes into numerous sinkholes. Mighty layers of nutrient-rich sediments have been deposited in the Polje, where they are partly relocated during severe discharges. Photo: Werner Konold.

Zum Cerkniško Polje: Das Polje ist über 10 km lang und ca. 5 km breit und liegt auf grob 550 m NN. Im Polje bildet sich regelmäßig ein temporärer See (Cerkniško Jezero), der heute eine Ausdehnung von 2.700 bis 3.800 ha erreichen kann (Abb. 15). Er ist damit der größte See Sloweniens. Die Siedlungen – die größte ist Cerknica (Zirknitz) – liegen hochwassersicher am Rand. Die Wasserzufuhr geschieht durch Quellen im Südosten, wo der Obrh wieder zutage tritt, durch zahlreiche weitere Quellen am Südwestrand, wo sich das völlig gewässerlose Javorniki-Gebirge erhebt, sowie durch mehrere Zuflüsse von Nordosten, von denen die Cerkniščica der wasserreichste ist (Abb. 16). Bei der Exkursion konnten wir noch sehen, dass die Quellen bis vor Kurzem sehr stark geschüttet haben müssen. Die Quellaustritte ziehen sich eindrucksvoll die Hänge hoch. Ein interessantes Phänomen konnten wir an den Obrh-Quellen beobachten. Myriaden von toten Eintagsfliegen bedeckten die Wasserflächen und die Ufer und verbreiteten einen pe-

netranten Geruch. Diese „Biomasse“ wurde früher gesammelt und als Düngemittel verwendet. Das sagt uns viel: Die Quelltümpel sind ein exzellenter Lebensraum für Eintagsfliegen (die sich ja im Wasser entwickeln), die wiederum eine gute Nährstoffressource waren.

Der Obrh wird zum Stržen, der dann im Nordwesten in Ponoren (Große und Kleine Karlovica), verschwindet (Abb. 15). Bei Hochwasser wird hier das Wasser viele Meter hoch zurückgestaut. Es führt ungeheure Mengen an organischem Material von den abgestorbenen Röhrichten mit sich. Rechen unterschiedlicher Art halten es ein Stück weit zurück. Der See ist eutroph. Insbesondere bei Niedrigwasserführung der Zuflüsse findet teilweise ein recht hoher Eintrag an Stickstoff und Phosphor statt. In einer Studie aus dem Jahr 2009 wurde die Landwirtschaft als Hauptverursacher identifiziert (Drev et al. 2009).

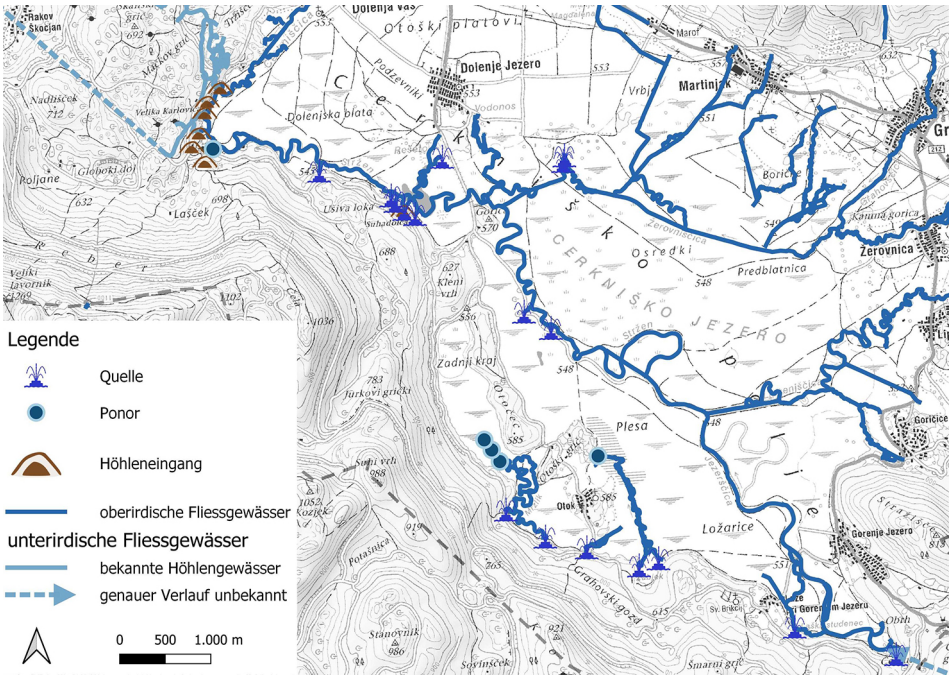


Abb. 15: Das Cerkniško Polje, in dem sich der mehrere Tausend Hektar große Cerkniško Jezero (Zirknitzer See) bildet.

Fig. 15: The Cerkniško Polje, where the several thousand hectares large Cerkniško Jezero (Lake of Zirknitz) emerges.

Die landwirtschaftliche Nutzbarkeit kann sich – je nach maximalem Wasserstand und Geschwindigkeit des Abflusses – von Jahr zu Jahr stark ändern. Möglich ist im Überflutungsgebiet allenfalls eine Wiesennutzung, die auch allenthalben noch praktiziert wird. Dass früher auf den in der Regel überflutungsfreien Flächen auch Ackerbau betrieben wurde, kann man

an Stufenrainen und Wölbackerstrukturen erkennen. Die landwirtschaftlichen Flächen sind kleinparzelliert (Abb. 16).

Abb. 16: Das Cerkniško Polje, im Hintergrund vor dem Javorniki-Gebirge die Wasserfläche des temporären Sees, im Vordergrund kleinparzellierte landwirtschaftliche Flächen mit Wiesen und Äckern. Foto: Werner Konold.

Fig. 16: Cerkniško Polje; in the background in front of the Javorniki Mountains the water surface of the temporary lake, in the foreground small parceled agricultural areas with meadows and fields. Photo: Werner Konold.

Einen schönen Einblick in die kleinbäuerlichen Verhältnisse und Nutzungsformen erhält man in dem Örtchen Otok im Süden (Otok heißt Insel). Die Vegetation besteht ansonsten aus Pfeifengraswiesen, Groß- und Kleinseggenrieden und verschiedenen Röhrichten, darunter ausgedehnte Teichbinsenbestände, deren abgestorbenen Reste in Buchten und bei den Ponoren dicke, teils begehbare Matten bilden (Abb. 17).

Im Polje befinden sich mehrere Schluck- und „Speilöcher“ (wie es in älteren Quellen heißt). Der verschwindende und wiederauftauchende See hat die Phantasie der Menschen schon seit Hunderten von Jahren angeregt und zu entsprechenden Spekulationen geführt (dazu z. B. Erdmann 2023). Bereits Johann Weichard von Valvasor hatte sich Gedanken zum Wasserhaushalt des Poljes gemacht und dies in einem Plan 1689 festgehalten. Sehr anschaulich und plausibel sind die Risse und Modelle von Von Steinberg (1761), ebenfalls direkt bezogen auf den Zirknitzer See (Abb. 18).

Abb. 17: Blick ins Cerkniško Polje bei höherem Wasserstand. Am Rand werden große Mengen von Röhrichtstreu zusammengeschwemmt, die eine tragfähige Matte bilden. Foto: Werner Konold.

Fig. 17: View into Cerkniško Polje at a higher water level. Large quantities of reed litter are washed ashore, forming a stable mat. Photo: Werner Konold.

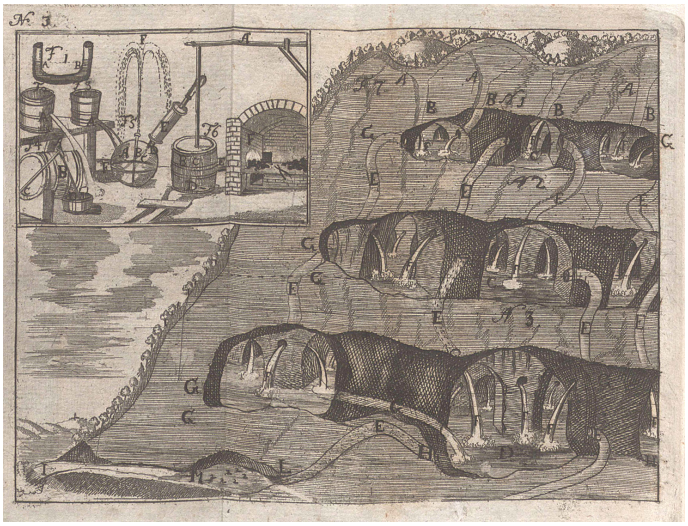


Abb. 18: Franz Anton von Steinbergs Modell der karsthydrologischen Verhältnisse um den Zirknitzer See (Steinberg 1761).

Fig. 18: Franz Anton von Steinberg's model of the karst hydrological relationsships at Lake Zirknitz (Steinberg 1761).

7.1.2 Rakov Škocjan

Der in den Ponoren des Cerkniško Polje verschwundene Rak nimmt unter Tage weiteres Karstwasser auf und kommt im Rakov Škocjan für etwa 2,5 km wieder zum Vorschein (Abb. 19). Bei der Zadnje Jama tritt der Fluss etwa 30 m unter der Erdoberfläche aus, wird zunächst sichtbar und begehbar in zwei tiefen Löchern, unterquert dabei die Kleine Naturbrücke (Mali naravni most, Abb. 20). Nach dem Wiederaustritt durchfließt der Rak ein Tal, das durch den Einbruch der Decke aus kreidezeitlichen Kalken entstanden ist, bevor er nach der Passage der „Großen Naturbrücke" in der Tkalca-Höhle unterhalb der Kapellenruine von Sankt Kanzian wieder verschwindet (Abb. 21). Die beiden Naturbrücken sind als letzte Reste der eingestürzten Höhlendecke verblieben. Der Blick und auch die teils unterirdische Begehung der Wasserstrecken sind atemberaubend. Das Schutzgebiet (seit 1949) ist mit einem schönen Pfad erschlossen.

Die Wasserführung des Rak schwankt extrem – von wenigen bis zu mehreren 10.000 Sekundenlitern (Silan 1995). Bei solchen Hochwasserabflüssen gibt es vor den Schlucklöchern und Höhlen enorme Rückstaue. Das Tal wird dann viele Meter hoch überstaut. Dementsprechend besteht der Talboden aus mächtigen, nährstoffreichen Auensedimenten. Auf etwa der Hälfte der Talstrecke tritt auf der linken Seite die mächtige Kotliči-Quelle zu Tage (Abb. 22). Ihre Schüttung kann bis zu 30.000 Sekundenlitern anschwellen.

Die Naturbrücken wurden von Valvasor (1689) erstmals literarisch erwähnt (s. o.). Beim Austritt des Rak in das Tal kann man noch die Reste eines Mühlenstaus und einer Mühle erkennen. Es soll drei Sägemühlen gegeben haben. Zwei davon waren um 1750 gebaut und 1853 bei einem schweren Hochwasser zerstört worden. Die umgebenden Wälder wurden intensiv jagdlich und für die Holzkohlenproduktion genutzt. Die forstliche Nutzung nach deutschem Vorbild setzte 1908 ein und veränderte die Baumartenzusammensetzung zugunsten der Fichte (Silan 1995).

7.1.3 Planinsko Polje

Der Rak nimmt während seines unterirdischen Verlaufs die Pivka auf und tritt am Mund der Planinska Jama als Unica zu Tage (Abb. 23). Nach kurzem Verlauf fließt bei Malni die Malenščica zu. Am Ausgang der Höhle wird Wasser zur Wasserkraftnutzung in einen Kanal ausgeleitet (Abb. 24). Die Höhle ist nach Anmeldung mit einer Führung begehbar. Überwiegend gesäumt von Gehölzen schlängelt sich die Unica in weiten Bögen über rund 17 km durch das Polje und verliert in ihrem Verlauf in Schlucklöchern und Spalten sehr viel Wasser. Soweit eine landwirtschaftliche Nutzung stattfindet, besteht diese aus Weiden und überwiegend Wiesen (Abb. 25), die je nach Ausprägung des Mikroreliefs ein Spektrum von wechseltrockenen, mageren bis zu feuchten, staudenreichen Lebensgemeinschaften abdecken. Alle Grünländer sind artenreich und bunt, zum Beispiel bei der Blüte der Sumpf-Gladiole und verschiedener Orchideen.

Auch das Planinsko Polje ist einem extremen Wasserregime unterworfen. Nach der Vereinigung mit der Malenščica hat die Unica am Pegel Haasberg einen mittleren Niedrigwasserabfluss von

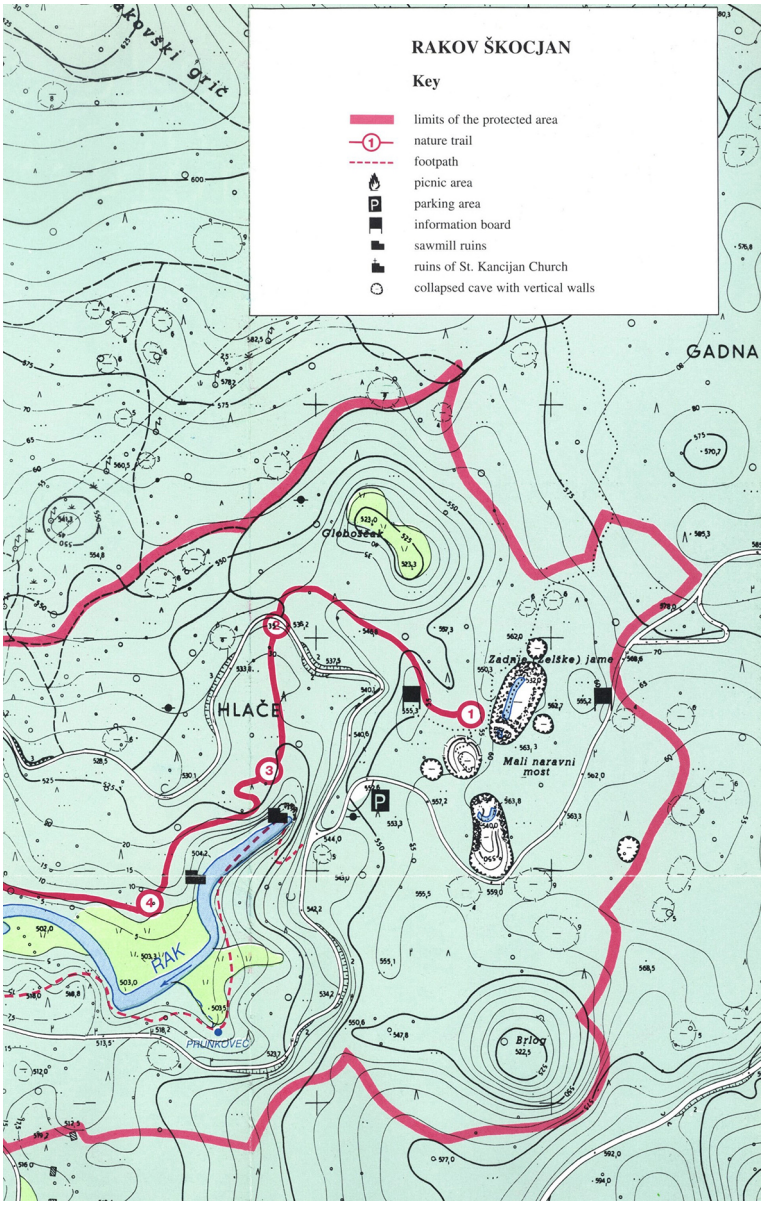


Abb. 19: Südöstlicher Teil und Beginn des Schutzgebiets Rakov Škocjan mit den tiefen Einbrüchen der Höhlendecke (Silan 1995)

Fig. 19: Southeastern part and border of the Rakov Škocjan reserve with deep collapses of the cave ceiling (Silan 1995)

Abb. 20: Rakov Škocjan: Blick nach unten (links), Blick nach oben (rechts; Fotos: Peter Wattendorf). Die Kleine Naturbrücke ist „von so zarten und so kühnen Dimensionen, dass sich mancher Baumeister besinnen würde, ein solches Bauwerk herzustellen, wie es hier die Natur geschaffen hat“ (Franz Kraus, 1888).

Fig. 20: Rakov Škocjan: View downwards (left panel), view upwards (right panel; photos: Peter Wattendorf). The Small Natural Bridge is “of such delicate and bold dimensions that many an architect would ponder establishing such a structure as nature has created here” (Franz Kraus, 1888).

Abb. 21: Der Rak verschwindet in der Tkalca Jama. Foto: Werner Konold.

Fig. 21: The River Rak disappears in Tkalca Jama. Photo: Werner Konold.

Abb. 22: Die Kotliči-Quelle; Die Schüttung von Karstquellen ist äußerst variabel und stark an die Höhe des Niederschlags gekoppelt. Foto: Werner Konold.

Fig. 22: The Kotliči spring; the flow of karst springs is extremely variable and strongly linked to the amount of precipitation. Photo: Werner Konold.

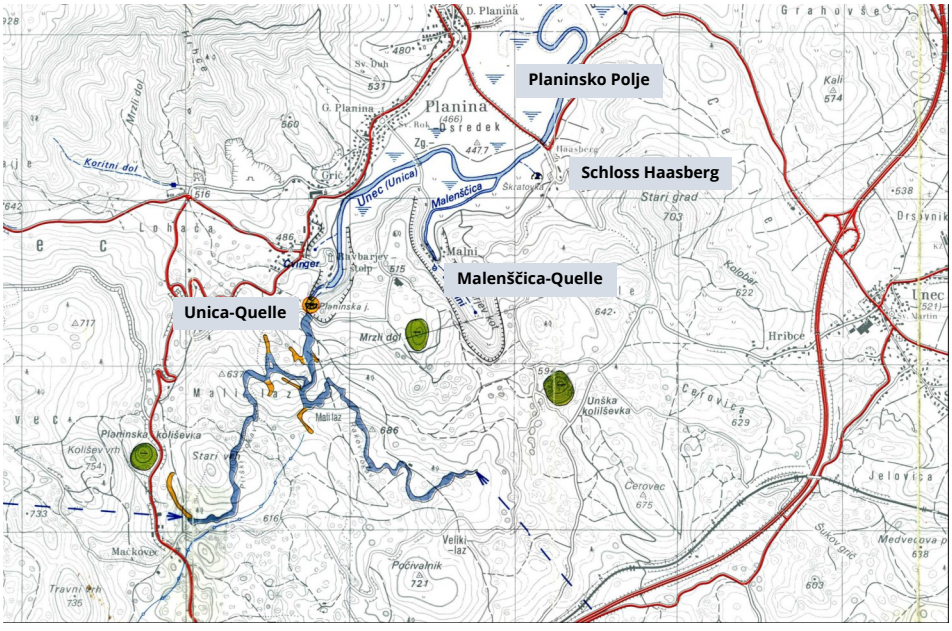


Abb. 23: Südlicher Teil des Planinsko Polje (Höhlenkarte 1:20 000, Geodetski Zavod Slovenije, 1996).

Fig. 23: Southern part of Planinsko Polje (Cave Map 1:20 000, Geodetski Zavod Slovenije, 1996).

Abb. 24: Planinska Jama mit Austritt der Unica („Unica-Quelle"); links der Kraftwerkskanal. Foto: Werner Konold.

Fig. 24: Planinska Jama with the source of river Unica; on the left the channel to the power plant. Photo: Werner Konold.

Abb. 25: Das Planinsko Polje mit dem Dorf Laze von Süden. Foto: Werner Konold (2010).

Fig. 25: Planinsko Polje with the village of Laze viewed from the south. Photo: Werner Konold (2010).

1,1 m³/s, einen mittleren Mittelwasserabfluss (MQ) von 21 m³/s und einen mittleren Hochwasserabfluss (MHQ) von über 100 m³/s. Die Überflutung in der Fläche beginnt ab einem Abfluss von 60 m³/s (Blatnik et al. 2017). Ab dann ist eine Messung eigentlich nicht mehr möglich. Hilfsweise wird die Wasserstandshöhe gemessen (Abb. 26). Die Dauer der Überflutung kann wenige Wochen bis zu drei Monaten betragen. Bei einem Jahrhunderthochwasser im Februar 2014 wurden 10,3 km² eingestaut und dabei fast 80 Mio m³ Wasser gespeichert (Blatnik et al. 2017).

Abb. 26: Pegel neben der Malenščica bei Malni kurz unterhalb der Quelle. Das Ende der Pegellatte befindet sich fünfeinhalb Meter über dem Boden. Foto: Werner Konold.

Fig. 26: Gauge next to the Malenščica river near Malni just below the spring. The top of the gauge staff is five and a half meters above the ground. Photo: Werner Konold.

Bei unserer Exkursion hatte die Unica noch eine mittlere Wasserführung, die ganz im Norden gegen Null ging. Wie oben bereits angedeutet, befinden sich dort ausgebaute Ponore – bis zu 10 m tief –, die ein Schluckvermögen von bis zu 40 m³/s haben. Sie gelten als technische Denkmale und tragen den Namen ihres ursprünglichen Erbauers: Putickove Štirne (Abb. 27; Kranjc 1996, Blatnik et al. 2017).

Abb. 27: Ausgebauter Ponor im Norden des Planinsko Polje, benannt nach seinem ursprünglichen Erbauer Wilhelm Putick. Foto: Werner Konold.

Fig. 27: Enlarged ponor in the northern part of Planinsko Polje, named after its original builder Wilhelm Putick. Photo: Werner Konold.

Abb. 28: Ruine des Schlosses Haasberg (linke Tafel; Foto: Werner Konold), historischer Zustand (rechte Tafel; Tafel beim Schloss).

Fig. 28: Ruins of Haasberg Castle (left panel; photo: Werner Konold), historical condition (right panel; information panel at the castle).

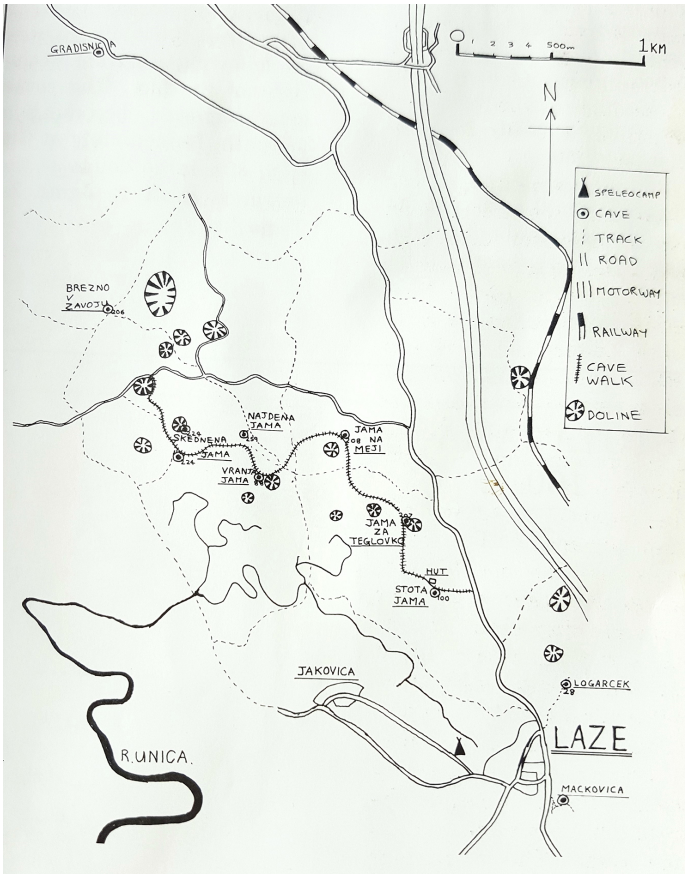


Abb. 29: Der Höhlenpfad bei Laze (Bishop 1997).

Fig. 29: The cave walk near Laze (Bishop 1997).

Im Süden des Poljes kann man die eindrucksvolle Ruine des Schlosses Haasberg (Abb. 28) bewundern. Das Schloss wurde Anfang des 17. Jahrhunderts von den Fürsten von Eggenberg erbaut. Es war zu dieser Zeit das mächtigste barocke Herrenhaus in Slowenien, umgeben von einem schönen Park. Letzte Besitzerin war die Familie Windisch-Graetz, die das Schloss 1846 erworben hatte. Inhaber Fürst Maximilian wurde 1945 aus Jugoslawien vertrieben. Die Familie zog nach Italien. Das Schloss war zunächst vom italienischen, dann vom deutschen Militär übernommen worden, schließlich 1944 von slowenischen Partisanen zerstört und niedergebrannt.

7.1.4 Höhlenpfad bei Laze

Der Höhlenpfad Laze ist ein Wanderweg direkt oberhalb vom Planinsko Polje, der auf einer Rundstrecke zu zahlreichen Höhlen und Dolinen führt (Abb. 29) – theoretisch jedenfalls! Die aus den 1990er Jahren stammenden Wegmarkierungen sind nicht mehr durchgängig vorhanden, so dass längeres Orientieren notwendig werden kann. Wenn man den Weg findet, kann man Schachthöhlen (Vorsicht! Ohne Geländer!) und eine Durchgangshöhle (Skednena Jama) bewundern.

Abb. 30: Vranja Jama. Foto: Ingrid Stober.

Fig. 30: Vranja Jama. Photo: Ingrid Stober.

Eine der spektakulärsten der begehbaren und von uns besuchten Höhlen ist die Vranja Jama mit einem gewaltigen Eingangsportal am Grund einer circa 100 m tiefen Doline (Abb. 30), aus der uns ein kühler Nebel entgegenschlug. Der Abstieg ist steil und schlüpfrig. Die Höhle ist mehr als 500 m lang, 90 m tief; ein Verbindungsgang führt weiter zur Mrzla Jama, aus der man in das Polje absteigen kann. Aufgrund mächtiger Lehmauflagen bilden sich periodische Gewässer, wo auch Grottenolme (*Proteus anguinus*) zu finden sein sollen (Bishop 1997).

7.2 Flussgebiet der Reka

7.2.1 Škocjanske Jame

Die Höhlen von Škocjan liegen in der Nähe des gleichnamigen Ortes und ca. 20 km östlich von Triest im westslowenischen Karstplateau im UNESCO-Biosphärenreservat Škocjanske Jame. Das beeindruckende Höhlensystem und die professionelle Ausgestaltung der über- und untertägigen Wanderwege wurden im Jahr 1986 zu Recht mit dem Titel UNESCO-Weltnaturerbe geadelt. Unsere Exkursion konnte am 30. Mai 2023 dieses Naturwunder besuchen, wobei die gewaltigen Dimensionen der Höhlen und der tosende Fluss mit seinen Wasserfällen immer in Erinnerung bleiben werden.

Abb. 31: Das UNESCO-Weltnaturerbe Škocjanske Jame. Die geführte Besichtigung geht von der großen Doline (links) durch die stille und die rauschende Höhle bis zum Ausgang 1. Von dort kann man auf dem rot gekennzeichneten Pfad die neu und spektakulär erschlossenen Abschnitte unter Tage und mit einem Blick zum Himmel in den Dolinen ohne Begleitung erkunden (Ausschnitt einer Tafel beim Besucherzentrum).

Fig. 31: The Škocjanske Jame UNESCO World Heritage Site. The guided tour leads from the large doline (left) through the silent and the murmuring cave to exit 1. From there, you can unaccompanied explore on the red marked path the newly and spectacularly opened up sections underground or with a view to the sky in the dolines (excerpt from a board at the visitor center).

Der für die Öffentlichkeit gut ausgebaute und gesicherte Pfad durch die Höhle ist rund 3,5 km lang (Abb. 31). Durch einen künstlich angelegten Stollen gelangt der Besucher zunächst in die Stille Höhle, die schönen Sinterschmuck aufweist (Abb. 32); sie wurde 1904 erschlossen. Danach können die Besucher ohne Höhlenführer entlang von gut gesicherten, meist bergmännisch erweiterten und gesicherten Passagen die Höhle erwandern. Die größte Halle ist die nicht für die Öffentlichkeit zugängliche Martelhalle mit 308 m Länge, bis 146 m Höhe und bis 123 m Breite. Der gut beleuchtete und sicher ausgebaute Wanderweg durch die Einsturzhöhle führt auch über eine Brücke, die sich in 45 m Höhe über den tosenden Fluss spannt (Abb. 33). Die durchschnittliche Höhe der zugänglichen Höhle beträgt 100 m.

Abb. 32: Kalzit-Sinterbecken in der stillen Höhle, entstanden durch Ausfällung aus mit Kalzit übersättigtem Wasser. Foto: Werner Konold (2010).

Fig. 32: Calcite sinter basin in the silent cave, formed by precipitation from water supersaturated with calcite. Photo: Werner Konold (2010).

Die nur 54 km lange Reka (slow. für „Fluss“) entspringt in Kroatien in einem Gebiet mit tonig-silikatischen Schichtfolgen (meist Ton- und Sandsteine), die als Flysch bezeichnet werden, weil sie auf turbiditische Trübeströme eines in Abtragung befindlichen Gebirges zurückgehen. Dann erreicht die Reka in Slowenien das Karstgebirge aus mesozoischen Karbonatgesteinen. Der ober- und unterirdische Flussverlauf ist generell NW–SE-gerichtet und folgt damit dem tektonischen Hauptbruchsystem der nordwestlichsten Dinariden (siehe Abb. 3). Noch bis vor ca. 100.000 Jahren soll die Reka oberirdisch bis zur Adria gelangt sein.

Erst im späten Pleistozän entwickelte sich das heutige Höhlensystem. Im ersten Abschnitt des durchströmten Kalkgebirges fließt die Reka oberirdisch durch Schluchten; eine Datierung ist über Schotterterrassen in den Schluchten möglich (Park Škocjanske Jame 2013). In der Sohle des Großen Tals bei Škocjan versinkt die Reka in das rund 6 km lange zugängliche Höhlensystem. Die Höhendifferenz zwischen dem höchsten Eingang (Okroglica) und dem tiefsten Punkt (Siphon) beträgt 205 m (siehe Abb. 31).

Die Höhle entstand durch Lösungskorrosion und durch die mechanische Einwirkung der geröllführenden Wassermassen zunächst im Niveau des ehemaligen spätpleistozänen Grundwasserspiegels; das Höhlendach erwies sich dabei besonders in den Massenkalken und Dickbankkalken als weitgehend stabil (Abb. 34).

Abb. 33: Spektakuläre Passage mit Blick in die rauschende Höhle, wo die Hankejev-Brücke die Reka überspannt. Fotos: Otto Ehrmann (2008).

Fig. 33: Spectacular passage with a view into the murmuring cave where the Hankejev Bridge spans the Reka river. Photos: Otto Ehrmann (2008).

Dabei erfolgte die Kalksteinkorrosion nicht flächenhaft, sondern entlang von tektonisch vorgezeichneten engständig geklüfteten Abschnitten (sog. Bretterklüftung, siehe Abschnitt 2). Durch kontinuierliche tektonische Hebung der slowenischen Dinariden erweiterte sich die Höhle auch in vertikaler Richtung, was natürlich zur Vergrößerung des Höhlenraumes führte. Nach starken Regenfällen kann der Durchfluss auf fast 400 m³/s anschwellen, bei einem ganz extremen Ereignis stieg der Wasserspiegel in den Schluchten und Höhlen mehr als 130 m (Park Škocjanske Jame 2013). Dies lässt erahnen, wie groß die mechanische Zerstörungskraft des mit Felsblöcken „beladenen“ Flusswassers ist. Die tektonischen Ereignisse, welche die Verkarstungsgeschichte und rapide Höhlenentstehung auslösten, werden in das jüngste Tertiär, also in das Pliozän gestellt (Vrabec et al. 2009, Wolkersdorfer & Matschullat, o. J.).

Abb. 34: Die von der Reka durchströmte aktive Höhle ist weitgehend frei von Sinterschmuck, was auf die rapide Entwicklung der Höhle hinweist. Aufgrund ihrer Dimensionen ist sie dennoch ungewöhnlich beeindruckend. Die Schichtung der Dickbankkalke (rechts im Bild) ist gut erkennbar, die darüber folgenden Massenkalke sind stark vertikal geklüftet. Foto: Gundo Klebsattel.

Fig. 34: The active cave, through which the Reka flows, is largely free of sinter decoration, which indicates the rapid development of the cave. Due to its dimensions, it is nevertheless unusually impressive. The layering of the thick limestones (on the right in the picture) is clearly visible, the mass limestones above are strongly fractured. Photo: Gundo Klebsattel.

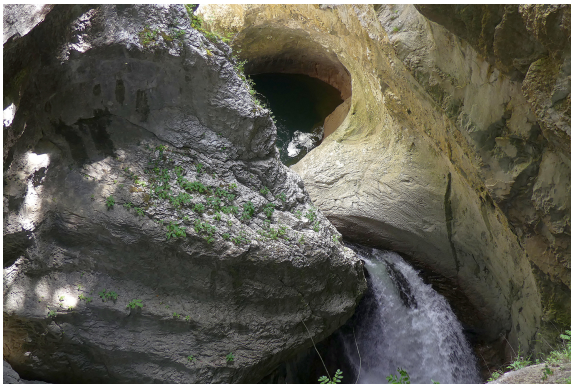


Abb. 35: Große Strudeltöpfe zeigen an, dass die Karstkorrosion entlang der Reka nicht nur chemisch, sondern auch in großem Umfang mechanisch durch mitgeführte Gesteinsblöcke erfolgte. Foto: Wolfgang Werner.

Fig. 35: Large swirl pots indicate that the karstic corrosion along the Reka river was caused not only chemically, but also to a large extent mechanically by entrained rock blocks. Photo: Wolfgang Werner.

7.2.2 Dorf Škocjan, Reka, Grad Školj

Ein sehr schöner Spaziergang (Abb. 36) führte uns zunächst in das kleine, sehenswerte Dorf Škocjan, das auf einer großen Naturbrücke über der Reka liegt. Im Dorf befindet sich, umgeben von einer Mauer, die tiefe Schachtdoline Okroglica. Das Gebiet war wohl schon spätestens seit der Antike besiedelt. Škocjan ist nach dem Heiligen Kanzian/Kancijan benannt, dem noch weitere 22 andere Kirchen an Wasserläufen, Quellen und Flussschwinden geweiht sind (s. o.). Die ursprünglich gotische Kirche wurde im 17. Jahrhundert erweitert, der freistehende Kirchturm wurde 1758 erbaut. Sehenswert sind außerdem die kleinen, ehemals bäuerlichen Anwesen, der in den Fels gemeißelte Dorfbrunnen (eine Zisterne) sowie ein Regenwasserbecken, in dem sich ein üppiges Leben entwickelt hat. Das kleine Museum in einem ehemaligen Speicher vermittelt einen Eindruck von der früheren entbehrungsreichen Lebensweise. Auf dem Dorffriedhof sind einige bekannte Höhlenforscher begraben.

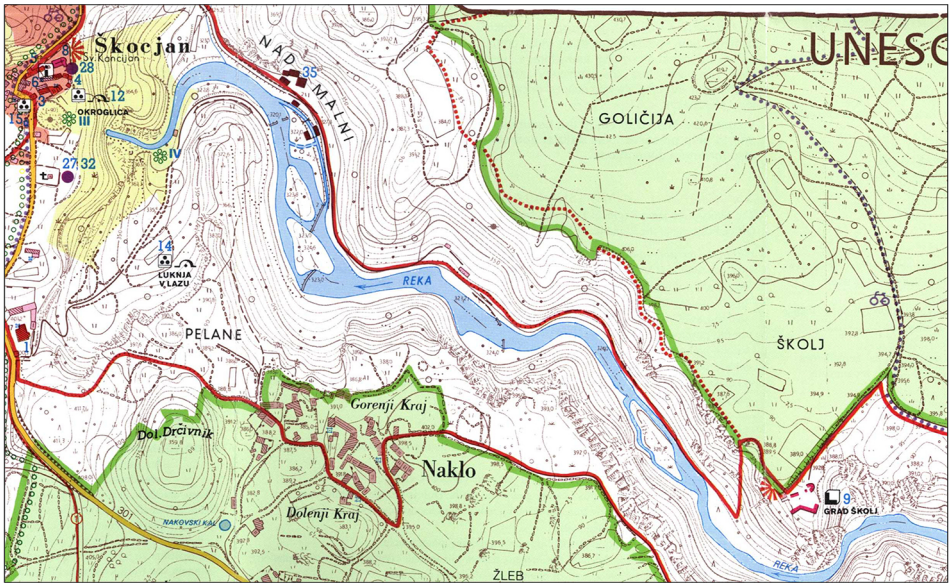


Abb. 36: Der Wanderweg Reka-aufwärts mit Mühlenwehren, Mühlenruinen (Nad Malni) und Grad Školj (Turistična Karta 1:6 000; Javni Zavod Park Škocjanske Jame, 1998).

Fig. 36: The Reka uphill hiking trail with mill weirs, mill ruins (Nad Malni) and Grad Školj (Turistična Karta 1:6 000; Javni Zavod Park Škocjanske Jame, 1998).

Dass die Reka in dieser Karstregion der Fluss schlechthin ist, kann man, wenn man wie wir etwas flussaufwärts wandert, an den zahlreichen, teils ruinösen Wehren, den Mühlkanälen und den eindrucksvollen Resten von Mühlen („nad malni“) erkennen. Die massive Bauweise, speziell auch der Kanalufer, zeugt von der enormen hydraulischen

Beanspruchung der Gebäude bei höheren Abflüssen.

Vorbei an wunderschönen Staudenfluren (mit Diptam!) führt der Weg steil hoch zur Burg Neukhoffel (Grad Školj), einer von ehemals neun Burgen im Tal der Reka. Die Burg, am steilen Abfall zur Reka errichtet, wurde erstmals 1426 schriftlich erwähnt, bauliche Befunde deuten auf die erste Hälfte des 13. Jahrhunderts hin. Sie war Sitz des Grafen von Duino, 1483 ging sie an den Habsburger Herzog Nicola Raubar und wurde dann an die Familie Neuhaus verkauft, die die Burg renovierte. Sie hieß nun Neukhoffell oder Novisciglio. Im 16. Jahrhundert wurde das Bauwerk an Baron Janez Franco Rossetti verkauft, der sie zu einer komfortablen Residenz umgestalten ließ. Eine neue Straße verband sie mit dem östlich gelegenen Dorf Famlje. Die Burg ist heute in einem ruinösen Zustand (Abb. 37). Kulturgeschichtlich interessant ist eine Reihe von zu Kopfbäumen erzogenen Maulbeerbäumen.

Abb. 37: Arbeitsessen auf der Burg Neukhoffell. Foto: Ingrid Stober.

Fig. 37: Working dinner at Neukhoffell Castle. Photo: Ingrid Stober.

Die „größte Höhlenburg der Welt“ erhebt sich ein paar Kilometer westlich von Postojna majestätisch hoch über einem Ponor der Lokva an einer fast senkrechten Wand von 120 m Höhe (Abb. 38). Die Höhle wurde schon von Paläolithikern genutzt. Die ursprüngliche Burg wurde im 12. Jahrhundert erbaut. Sie befand sich im Besitz der Patriarchen von Aquileia und der Habs-

burger. Verwalter und Burgherren waren die Herren von Luegg, die als Raubritter ihr Unwesen trieben. Der berüchtigste war Erasmus von Luegg, der von Niklas von Raubar (s. o.) zur Strecke gebracht werden sollte. Ein Jahr lang wurde die Burg ohne Erfolg belagert. Die Versorgung der Burgbewohner geschah, so die Legende, über das ausgedehnte Höhlensystem. Der heutige Bau stammt aus dem letzten Drittel des 16. Jahrhunderts. Den Luegg folgten als Burgbesitzer die Freiherrn von Prossegg und ab 1846 ein Fürst des Hauses Windisch-Graetz.

Abb. 38: Predjamski Grad. Foto: Werner Konold.

Fig. 38: Predjamski Grad. Photo: Werner Konold.

7.3 Trnovski Gozd

Der Trnovski Gozd (Abb. 39), ein circa 35 km langer und bis 1495 m ü. NHN hoher Gebirgszug, ist wesentlicher Teil des slowenischen Hohen Karstes (Dinarischer Gebirgswald) und ein nördlicher Ausläufer des den Balkan durchziehenden großen Waldes. Die durchschnittlichen Jahresniederschläge auf dem Plateau betragen 1700-3200 mm, eine Schneedecke kann von November bis Ende April vorhanden sein. Die mittlere Jahrestemperatur in 1200 m ü. NN liegt bei 4,5 °C (Mulec et al. 2021).

Die Tour führte uns über Podkraj, Col und Predmeja: Sehr ruhig, sehr ländlich, zahllose Dolinen, herrliche, artenreiche Wiesen – wunderbar!

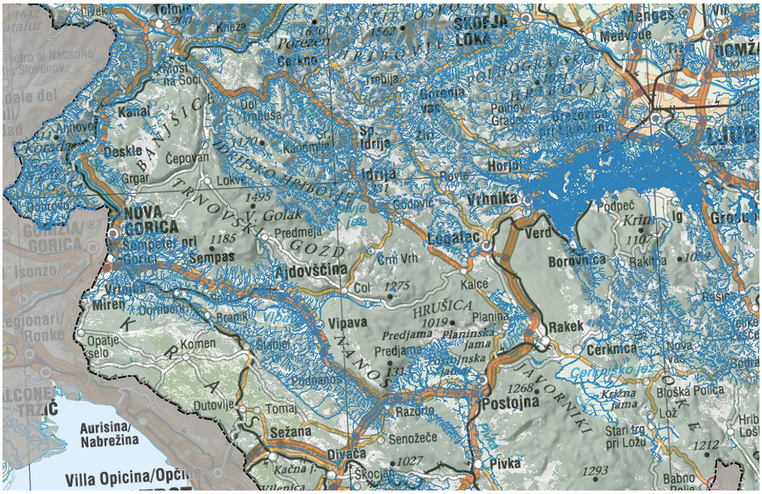


Abb. 39: Hoher (Trnovski Gozd) und küstenländischer Karst (Kras) mit Fließgewässernetz. Kartengrundlage: Geodaten der Surveying and Mapping Authority of the Republic of Slovenia (https://ipi.eprostor.gov.si, letzter Zugriff: 28.11.2023).

Fig. 39: High (Trnovski Gozd) and coastal karst (Kras) with the system of watercourses. Map basis: geodata of the Surveying and Mapping Authority of the Republic of Slovenia (https://ipi.eprostor.gov.si, last access: 28 November 2023).

7.3.1 Karstentwaldung und -aufforstung

Die Dinarischen Tannen-Buchenwälder auf dem Hochplateau des Trnovski Gozd waren angeblich bis zum Beginn des 16. Jahrhunderts frei von forstwirtschaftlichen Aktivitäten. Auch bei der späteren Exploration der Wälder wurde der Erhaltung einer weitgehend geschlossenen Waldstruktur die große Bedeutung zugemessen, die sie im Karst für den Schutz des Bodens auch besitzt. Vielfach wurde und wird Plenterwirtschaft betrieben (Trontelj 1998).

Im Gegensatz dazu wurden die ursprünglichen (Stein-) Eichen- und Hopfenbuchenwälder des meist unterhalb circa 500 m ü. NHN gelegenen mediterranen Karstes, auch „küstenländischer" Karst genannt (Abb. 39), bereits in römischer und venezianischer Zeit durch die Entnahme großer Holzmengen für Schiffbau oder Brennholznutzung sowie Weidewirtschaft (mit Ziegen!) und Waldbrände stark devastiert (Gašperšič 1988). Trotz früher Regelungen zum Schutz des Waldes – so gab es in Triest schon 1150 ein Verbot der Ziegenweide (Prpić 1986) – war bis Mitte des 19. Jahrhunderts der mediterrane Karst weitgehend entwaldet. Hochwälder waren praktisch nicht mehr vorhanden und die Böden waren stark erodiert (Tomašević 1986).

Bereits im 18. Jahrhundert wurde vermehrt vor den schwerwiegenden Folgen der „Verkarstung" gewarnt und es gab Anregungen zur Wiederaufforstung des Karstes. Organisierte Aktivitäten

hierzu folgten ab 1878 (Wessely 1876, Tomašević 1986), es wurden „Karstaufforstungskommissionen“ mit dem gesetzlich festgelegten Ziel gegründet, Aufforstungen zu forcieren und zu koordinieren, und es wurden entsprechende Geldmittel bereitgestellt.

1875 wurde in Postojna der „Krainisch-Küstenländische Forstverein“ mit dem Ziel gegründet, Waldwirtschaft und damit das Allgemeinwohl zu fördern. Sein Wirkungsfeld umfasste die meisten großen Waldgebiete des heutigen Slowenien. Mitglieder waren in allen Sparten der Waldwirtschaft tätige Fachleute. Der Verein beschäftigte sich auf regelmäßigen Tagungen und in einer eigenen Zeitschrift sehr intensiv mit wissenschaftlichen Fragstellungen und der Förderung der Karstaufforstung, darüber hinaus aber u. a. auch mit der Schulung des Forstpersonals (Zupančič 1988).

Die weithin degradierten Böden des mediterranen Karstes wurden vor allem mit der Schwarzkiefer (*Pinus nigra*) bepflanzt, die sich als Pionierbaumart auch auf den ertragsschwächsten Standorten bewährte. Zwischen 1895 und 1914 wurden so fast 11.000 ha „verödete Karstflächen“ (Gašperšič 1988) aufgeforstet; nach dem Ersten Weltkrieg nochmals circa 5.000 ha. Auf einer Vielzahl von Tagungen und Kongressen, sogar auf der Weltausstellung in Paris (1900) wurden die Erfolge der Karstaufforstungen präsentiert. Sowohl Schwarzkiefer als auch – auf etwas besseren Standorten – die autochthonen Laubbaumarten konnten sich im Lauf der Zeit auch wieder natürlich ausbreiten. Im Jahr 1980 betrug der Waldanteil im küstenländischen Karst wieder circa 41 % (Gašperšič 1988).

7.3.2 Vegetationsumkehr in Dolinen und tiefen Höhlen

Das Phänomen der Vegetationsumkehr in tiefen Dolinen wurde erstmals von Günther Ritter Beck von Mannagetta (1906) beschrieben: Infolge Temperaturinversion mit Kaltluft am Grund sehr tiefer Dolinen entsteht eine umgekehrte Reihung der Vegetationszonen im Vergleich mit dem Hochgebirge. So findet sich in der von uns besuchten Paradana-Doline (s. u.) auf circa 50 Höhenmetern (von 1180 m ü. NHN abwärts) die gleiche Pflanzenzonation wie am nahegelegenen Berg Goljak (bis 1496 m ü. NHN). Beim Abstieg in die Doline kann folgende Vegetationsabfolge beobachtet werden:

Tannen-Buchenwald – subalpiner Fichtenwald mit reichlichem Strauchwuchs aus Erlen, Weiden, Preiselbeeren (*Vaccinium vitis-idaea*) – Latschenkiefern/subalpine Sträucher, z.B. Alpenrose (*Rhododendron hirsutum*) – Zwergweiden – alpine Kräuter, z. B. Krainer Aurikel (*Primula carniolica*) – Moose am Grund der Doline.

Besonders ausgeprägt sind Temperaturunterschiede, wenn sich am Fuß der Dolinen nicht nur mächtige Blockschutthalden gebildet haben, sondern sie in eine Höhle münden, wie in unserem Fall die berühmte Paradana-Eishöhle (Abb. 40).

Abb. 40: Vegetationsumkehr in der Doline der Paradana-Eishöhle. Foto: Werner Konold.

Fig. 40: Vegetation inversion in the doline of the Paradana ice cave. Photo: Werner Konold.

7.3.3 Paradana-Eishöhle

Der Eingang der Paradana-Eishöhle (Velika ledena Jama v Paradani) befindet sich am Grund der rund 50 m tiefen gleichnamigen Doline. Hier sammelt sich im Winter Schnee an, der aufgrund der Kaltluftzirkulation aus der Höhle bis in den Sommer hinein erhalten bleiben kann. Die Höhle ist mehr als 7 km lang und 850 m tief. Aufgrund der ausgeprägt trichterförmigen Morphologie des Höhleneingangs rutschen Schnee, Erde, Blätter und Äste (sowie unvorsichtige Besuchende!) in die Höhle. Im Inneren der Höhle bildet sich in einer Tiefe ab circa 35 m permanentes Eis. Die Höhlenkammer Velika Ledena Dvorana enthält einen 12 m dicken Eiskörper mit einem Volumen von circa 8.000 m³ (Abb. 41). In den 1950er Jahren bis 1977 war der

Höhleneingang vollständig mit Eis gefüllt, erst nachdem das Eis abgeschmolzen war, konnte die Höhle weiter erforscht werden. Seitdem schrumpft der Eiskörper, beschleunigt durch relativ milde Winter in den letzten Jahren. In mehr als 200 m tiefen Teilen der Höhle ist kein Eis vorhanden (Mulec et al. 2021).

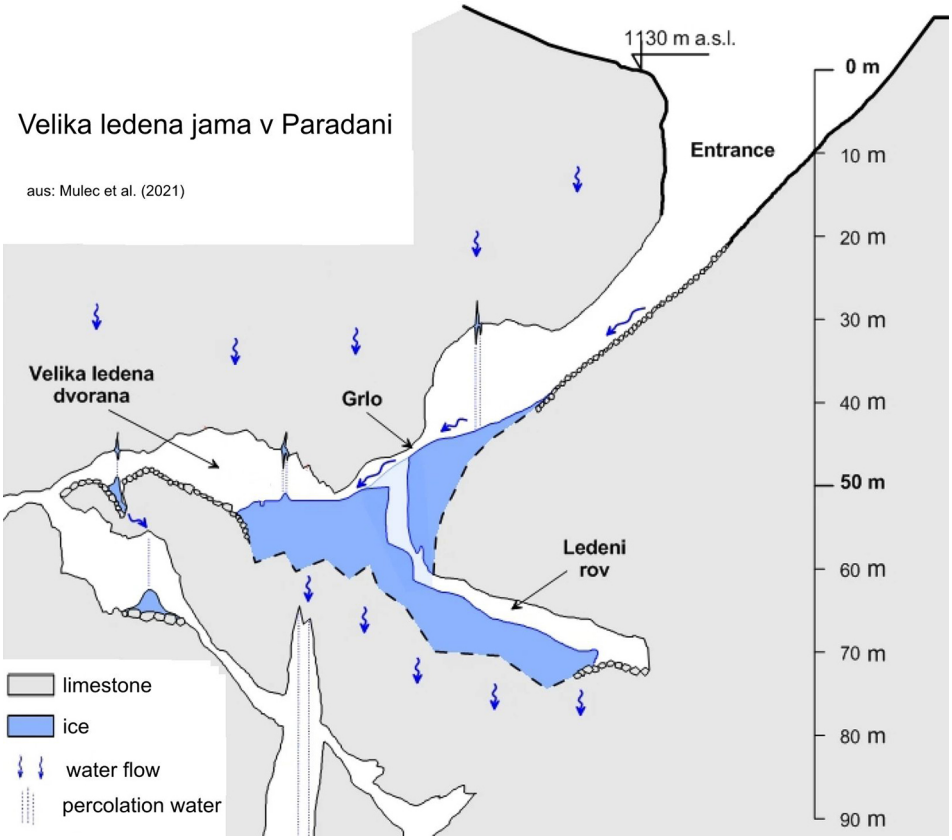


Abb. 41: Querschnitt durch den oberen Teil der Paradana-Eishöhle. Verändert nach Mulec et al. (2021).

Fig. 41: Cross-section through the upper part of the Paradana Ice Cave. Modified from Mulec et al. (2021).

Die Nutzung des Eises der Paradana und anderer Höhlen des Trnovski Gozd ist seit den 1860er Jahren dokumentiert. So wurden beispielsweise 1863 „viele tausend Centner Grubeneis" aus Dolinen und Höhlen des hohen Karstes gewonnen. 10 bis 40 kg schwere Eisblöcke schleppte man hierzu in Körben und auf Leitern aus den Höhlen. Das Eis wurde mit Ochsenkarren zu den Bahnstationen Postojna oder Nova Gorica transportiertund von dort per Bahn nach Triest,

Wien, Budapest oder sogar mit Dampfern bis Alexandria in Ägypten geliefert (Aichholzer 1876).

7.4 Soča-Tal

7.4.1 Fluss und Tal

Die Fahrt führte uns weiter über Lokve und Čepovan nach Tolmin und Kobarid im Tal der Soča. Die Soča entspringt in ca. 1000 m ü. NHN aus einer Karsthöhle, durchquert die südlichen Julischen Alpen und verlässt Slowenien nach 94 km Lauflänge bei Nova Gorica, bevor sie – nun Isonzo – nach weiteren 42 km südlich von Monfalcone in die Adria mündet. Ihr Einzugsgebiet umfasst circa 1.573 km². Bezogen auf diese Fläche hat die Soča eine sehr große mittlere Abflussspende von 61 l/s/km², was bei durchschnittlich 2.610 mm Jahresniederschlag im Einzugsgebiet verständlich ist (siehe Abschnitt 3). Der mittlere Niedrigwasserabfluss beträgt 9,6 m³/s, der Mittelwasserabfluss 92 m³/s und maximal wurden bis zu 2.134 m³/s gemessen (Bat et al. 2004). Abflussmaxima treten vor allem im April/Mai und Oktober/November (pluvionivales Regime) auf. Die ausgeprägte Verkarstung der Karbonatgesteine der Julischen Alpen mit Höhlen, Schächten und Klüften fördert die Sickerwasserbildung und so speisen unzählige ober- und unterirdische Quellaustritte sowie Nebengewässer den Fluss, was zu einer durchgehend niedrigen Wassertemperatur führt.

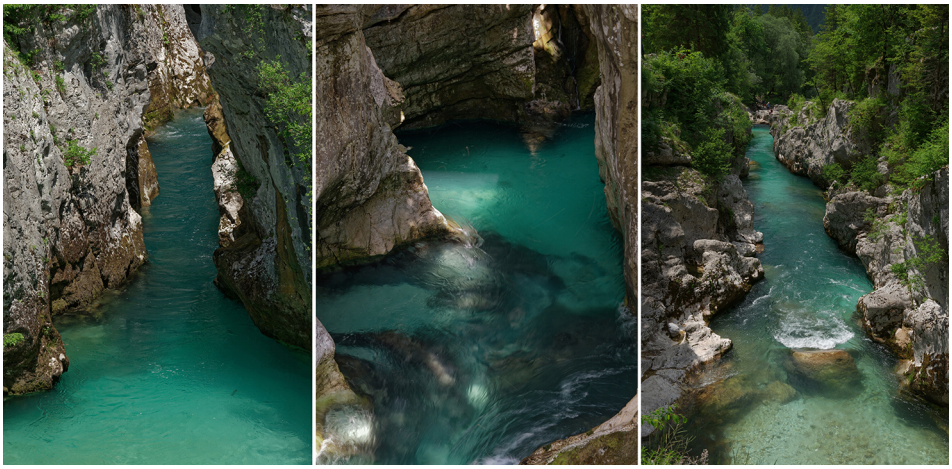


Abb. 42: Die Soča hat sich in sehr engen und tiefen Klammen in das Kalkgestein eingeschnitten. Fotos: Peter Wattendorf.

Fig. 42: The Soča has cut its way into the limestone in very narrow and deep gorges. Photos: Peter Wattendorf.

Das obere Soča-Tal, auch Trenta-Tal genannt, ist als U-Tal mit engem Talboden ausgeprägt. Der Fluss durchzieht als relativ schmales Gerinne sein infolge von Bergstürzen mit vielen, teils mehrere Meter durchmessenden, kantigen Felsblöcken garniertes Schotterbett. Den Fluss überspannen zahlreiche Hängebrücken, im Talraum finden sich kaum ebene Flächen und nur zwei kleine Siedlungen.

Flussabwärts der Ortschaft Soča weitet sich das Tal deutlich auf und breite Gewässerabschnitte wechseln mit Engstellen und sehr engen und tiefen Klammen (Korite). Flussabwärts der Mündungen der Nebenflüsse Lepenjica und Koritnica liegt die Kleinstadt Bovec in einem circa 2 km breiten Talkessel; ab hier fließt die Soča mit geringerem Gefälle in Richtung Kobarid, Tolmin und weiter zur Adria. Tektonische Prozesse, vor allem die schnelle Senkung des Bovecer Talkessels, fördern die Bildung sehr tiefer und enger Klammen im Soča- und Koritnica-Tal, die einen großen Teil der Schönheit dieser Flüsse ausmachen (Abb. 42).

7.4.2 Kozjak-Wasserfall

Der Bach Kozjak, auf einem schönen Spaziergang von Kobarid aus zu erreichen, entspringt aus mehreren Quellen in 1500 m ü. NHN unterhalb des Berges Krnčica (2142 m ü. NHN), fließt durch mehrere Klammen und bildet dabei sechs Wasserfälle, bevor er nach nur 6,4 km Laufstrecke nahe Kobarid in die Soča (circa 210 m ü. NHN) mündet. Nur zwei der sechs Wasserfälle sind für Besucher erreichbar: Der Veliki Kozjak mit seiner höhlenähnlichen natürlichen Halle (Abb. 43) und der 8 m hohe Mali Kozjak [9].

Abb. 43: Wasserfall Veliki Kozjak. Foto: Peter Wattendorf.

Fig. 43: Veliki Kozjak waterfall. Photo: Peter Wattendorf.

[9] https://www.soca-valley.com/de/abenteuersuche/natur/20201228094820 88/wasserfall-kozjak (letzter Zugriff: 18.1.2025)

Der Lauf des Kozjak-Baches mit seinen Wasserfällen ist als Naturschutzgebiet ausgewiesen[10], am und im Gewässer tummeln sich die Feuersalamander (*Salamandra salamandra*).

7.4.3 Boka-Wasserfall

Der Boka-Wasserfall wenige Kilometer südwestlich von Bovec ist der wasserreichste und mit einer Fallhöhe von 106 m und einer Breite von 18 m der mächtigste Wasserfall Sloweniens (Abb. 44).

Abb. 44: Der Boka-Wasserfall; links im Juni 2023 (Foto: Peter Wattendorf) und rechts mit starker Schüttung im September 2010 (Foto: Otto Ehrmann).

Fig. 44: The Boka waterfall; left in June 2023 (Foto: Peter Wattendorf) and right with heavy flow in September 2010 (photo: Otto Ehrmann).

Er wird von dem im Kanin-Massiv versickernden Wasser gespeist und tritt aus einer Höhle in einer senkrechten Felswand aus. Im Frühjahr nach der Schneeschmelze und im Herbst aufgrund meist größerer Niederschlagsmengen ist der Durchfluss am höchsten und kann bis zu 100 m³/s

[10] https://de.wikipedia.org/wiki/Kozjak-Fall (letzter Zugriff: 18.1.2025)

betragen. In trockenen Sommermonaten kann die Schüttung auf 2 m³/s abfallen. Die Wassertemperatur beträgt im Durchschnitt etwa 4,5 °C [11]. Bei geringerem Abfluss kann man flussaufwärts klettern und dabei die schönsten Wasserspiele und die Farben der Steine auf dem Gewässergrund bewundern.

7.4.4 Isonzo-Front

Die Vorgeschichte des Krieges zwischen Italien und Österreich-Ungarn ist durch gegenseitige Forderungen nach Gebietsabtretungen der formal verbündeten (Dreibund, ab 1882) Staaten gekennzeichnet. Die Triple Entente (GB, F, RUS) dagegen bestätigte in den geheimen Verhandlungen zum Londoner Vertrag (26. April 1915) die territorialen Forderungen Italiens, um es zur Bildung einer weiteren Front gegen die Mittelmächte zu bewegen. Italien trat daraufhin am 23. Mai 1915 auf der Seite der Entente in den Ersten Weltkrieg ein.

Abb. 45: Festung Kluže über der Koritnica-Schlucht. Foto: Gundo Klebsattel.

Fig. 45: The Kluže Fortress situated above the Koritnica Gorge. Photo: Gundo Klebsattel.

In der Folge wurden im Soča-Tal (italienisch Isonzo) zwölf große Schlachten zwischen Italien und den Mittelmächten Österreich-Ungarn und Deutsches Reich ausgefochten. Mit über einer Million getöteter, verwundeter und vermisster Soldaten gehören sie zu den verlustreichsten Kampfhandlungen des Ersten Weltkriegs. Elf italienische Offensiven konnten trotz großer

[11] https://www.soca-valley.com/de/abenteuersuche/natur/20201228105302 77/wasserfall-boka/ (letzter Zugriff: 18.1.2025)

Verluste auf beiden Seiten keine Entscheidung und praktisch keine Geländegewinne erzielen. Selbst in den Hochlagen der Berge wurde äußerst heftig gekämpft. Mehrfach unterminierten und sprengten Pioniereinheiten von feindlichen Soldaten besetzte ganze Berggipfel. Auch die Natur forderte Opfer, so starben im Winter 1916/17 mehr Soldaten durch Lawinen als durch direkte feindliche Waffeneinwirkung. Allerdings lösten beide Seiten durch Artilleriebeschuss gezielt Lawinen über feindlichen Stellungen aus. Erst in der letzten Schlacht drängten die stark geschwächte österreichisch-ungarische Armee und eine neu eingetroffene deutsche Armee unter massivem Einsatz von neuartigem Giftgas die italienischen Truppen bis nach Italien zum Piave zurück[12].

Überall im Soča-Tal verweisen Spuren und bauliche Relikte auf die Ereignisse: Felspfade, Kavernen, Stollen, Gräben, Bunker, Stacheldraht, Ausrüstungs- und Munitionsreste sowie zahlreiche Soldatenfriedhöfe und Gedenkstätten. Die Festung Kluže, an strategisch günstiger Stelle nahe Bovec gelegen (Abb. 45), wurde bereits im 15. Jahrhundert als hölzernes venezianisches Fort zur Sicherung und Befestigung des Tals gegen türkische Invasionen erbaut. Sie wurde mehrfach zerstört, z.B. 1797 von napoleonischen Truppen und bis ins 20. Jahrhundert immer wieder erneuert. Heute beherbergt sie ein Militärmuseum. Auch im Zentrum von Kobarid befindet sich ein eindrucksvolles Museum zur Geschichte des Ersten Weltkriegs (zum Krieg in den Alpen siehe z. B. Jordan 2008).

7.5 Bergwerk Raibl

Am letzten Exkursionstag, dem Rückreisetag, nach landschaftlich eindrucksvoller Fahrt durch die Julischen Alpen und über den Predelpass, trafen wir am Vormittag in Raibl ein. Dieser alte Bergbauort, slowenisch Rabelj und italienisch Cave del Predil genannt, liegt in der italienischen Provinz Udine (früher gehörte Raibl zu Kärnten). Seit römischer Zeit fand hier intensiver Erzbergbau statt. Zahlreiche Stollen und zu Tage austretende Abbaukammern sind oberhalb des Besuchergeländes noch erkennbar (Abb. 46).

Während die antiken Bergleute vor allem am Bleierz interessiert waren, stand im 19./20. Jh. die Gewinnung von Zinkerzen im Vordergrund. Der Silbergehalt im Erz ist sehr gering. Der Abbau erfolgte auf insgesamt 19 Sohlen mit einem 120 km langen Stollen- und Streckensystem; er erreichte eine Tiefe von circa 520 m. Große Teile des Ortes sind unterminiert, was im Jahr 1910 zum Tagesbruch führte, bei dem das kleine Krankenhaus im Untergrund verschwand. Endgültig eingestellt wurde der Bergbau im Jahr 1991. Heute bieten ein ausgedehntes Besucherbergwerk und das benachbarte Bergbaumuseum Informationen zu Geschichte, Bergbautechnik und Geologie (Abb. 46).

Die sulfidische Blei-Zink-Lagerstätte von Raibl zählt zu den sog. alpinotypen Blei-Zink-Lagerstätten. Bei diesen komplex aufgebauten Lagerstätten geht man von einer submarin erfolgten, synsedimentär-hydrothermalen Entstehung aus, die während der Ablagerung der überwiegend karbonatischen Sedimente in der ältesten Obertrias um 230 – 220 Mio. J. erfolgt

[12] https://de.wikipedia.org/wiki/Isonzoschlachten und https://www.isonzofront.de (letzter Zugriff: 18.1.2025)

Abb. 46: Das ehemalige Blei-Zink-Bergwerk in Raibl; unten in der Bildmitte ist der Besucherstollen zu erkennen. Foto: Werner Konold.

Fig. 46: The former lead-zinc mine in Raibl; the visitor gallery can be seen in the lower part of the picture. Photo: Werner Konold.

sein soll. Danach kam es im Zuge der alpinen Tektonik und der anschließenden Verkarstungsvorgänge zu umfangreichen Stoffumlagerungen; Erzanreicherungen erfolgten dann vor allem an tektonischen Strukturelementen. Besonders typisch für diesen Vererzungstyp sind schalig aufgebaute Zinkblendeerze („Schalenblenden"), die um Dolomitsteinklasten abgeschieden wurden (Schneiderhöhn 1962, Klemm & Schneider 1977, Maynard 1983). Die Erze treten in den sog. Raibler Schichten in Erzmassen, Erzsäulen und in gangförmigen Anreicherungen auf; das Verhältnis Zink zu Blei liegt bei 10:1. Die 300-400 m mächtigen Raibler Schichten bestehen aus einem mehrfachen Wechsel von Kalk-, Dolomit- und Mergelstein sowie Ton- und Sandstein; eingeschaltet sind Evaporite und Rauwacken (Jerz 1966).

Literaturverzeichnis

Aichholzer, J. 1876: Eis als forstliche Nebenutzung. *Mitteilungen Des Krainisch-Küstenländischen Forstvereins* 1: 60–63.

Bat, M., Beltram, G., Cegnar, T., Tehocnik, M. D., Grbovič, J., Krajnc, M., Mihorko, P., Brancelj, I., Remec-Rekar, S., Uhan, J. 2004: *Water Treasures of Slovenia*. Environmental Agency of the Republic of Slovenia, Ljubljana, 129 S.

Bavec, M., Novak, M., Poljak, M. 2013: *Geološka karta Slovenije 1:1.000.000 Geological map of Slovenia 1:1.000.000*. Geološki zavod Slovenije, Ljubljana.

Beck v. Mannagetta, Ritter, G. 1906: Die Umkehrung der Pflanzenregionen in den Dolinen des Karsts. *Sitzungsber d Akad d Wiss* 115: 3–19.

Beltram, G, Martinčič, J. 2013: *Höhlen von Škocjan – Im Herzen des slowenischen Karstes*. Škocjan Caves Park, Škocjan, 52 S.

Benischke, R. 1996: Wilhelm Putick – Höhlenforscher und Hydrologe. *Wiss Beiheft zu „Die Höhle"* 49: 11–21.

Bishop, I. 1997: *Cave Guide to Slovenia*. Riverside Reproductions, Watford, 78 S.

Blatnik, M., Frantar, P., Kosec, D., Gabrovšek, F. 2017: Measurement of the outflow along eastern border of Planinsko Polje, Slovenia. *Acta Carsologica* 46: 83–93. https://doi.org/10.3986/ac.v46i1.4774.

Bögli, A. (1964): Mischungskorrosion – ein Beitrag zum Verkarstungsproblem. *Erdkunde* 18: 323–331.

Cerny, I. (1989): Die karbonatgebundenen Blei-Zink-Lagerstätten des alpinen und außeralpinen Mesozoikums. Die Bedeutung ihrer Geologie, Stratigraphie und Faziesgebundenheit für Prospektion und Bewertung. *Arch f Lagerst forsch Geol B-A* 11: 5–125.

Del Ben, A., Finetti, I., Rebez, A., Slejko, D. 1991: Seismicity and seismotectonics at the Alps-Dinarides contact. *Bollettino di Geofisica Teorica e Applicata* 32: 155–176.

Drev, D., Slane, M., Panjan, J. 2009: Die Bewertung der Belastungen des Sees Cerknica durch Stickstoff und Phosphor. *Wasserwirtschaft* 12/2009: 32–37.

Erdmann, K. (2023): Die Entzauberung des „wunderbarsten Sees der Welt" – Der Zirknitzer See im Herzogtum Krain als Heterotopie in der länderbeschreibenden Reiseliteratur der Frühen Neuzeit. *In* Handke, M., Hering, K., Hoffmann, D. B., Sowa, O., Weber, M. (Hrsg.): Räume, Orte, Konstruktionen. (Trans-) Lokale Wirklichkeiten im Mittelalter und der Frühen Neuzeit. Mittelalter. Interdisziplinäre Forschung und Rezeptionsgeschichte, Beihefte 3, 78–91. https://doi.org/10.26012/mittelalter-27648.

Gašperšič, F. (1988): Der Wald im slowenischen Karstgebiet in seine Zukunft. *AFZ* 8/1988: 175–176.

Gospodarič, R., Zötl, J.G. (1976): Markierung unterirdischer Wässer, Untersuchungen in Slowenien 1972-1975. *Steir Beitr z Hydrogeologie* 28: 7–257.

Jerz, H. (1966): Untersuchungen über Stoffbestand, Bildungsbedingungen und Paläogeographie der Raibler Schichten zwischen Lech und Inn (Nördliche Kalkalpen). *Geologica Bavarica* 56: 7.

Jordan, A. (2008): *Krieg um die Alpen. Der Erste Weltkrieg im Alpenraum und der bayerische Grenzschutz in Tirol*. Zeitgeschichtliche Forschungen, 35. Duncker & Humblot, Berlin, 715 S.

Jurkovšeka, B., Biolchib, S., Furlanib, S., Kolar-Jurkovšeka, T., Zinib, L., Ježa, J., Tunisb, G., Baveca, M., Cucchib, F. 2016: Geology of the Classical Karst Region (SW Slovenia–NE Italy). *Journal of Maps* 12/51: 352–362. https://doi.org/10.1080/17445647.2016.1215941.

Klemm, D. D., Schneider, H. J. 1977: *Time- and stratbound ore deposits*. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 444 S.

Komac, M., Urbanc, J. 2013: Zemljevid površinske razširjenosti in stopnje zakraselosti območij v Sloveniji 1 : 250 000. Geološki zavod Slovenije (www.geo-zs.si/index.php).

Korbar, T. 2009. Orogenic evolution of the External Dinarides in the NE Adriatic region: A model constrained by tectonostratigraphy of Upper Cretaceous to Paleogene carbonates. *Earth-Science Reviews* 96: 296–312. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2009.07.004.

Kranjc, A. 1996: Putick's work on Karst Poljes. *Wiss Beiheft zu „Die Höhle"* 49: 73–78.

Kranjc, A. 2002: Historical overview and description of the caves. *In* Škocjan Caves Park (Hrsg.): The Škocjan Caves Park Monograph. Škocjan Caves Park, Škocjan, 53–66.

Kranjc, A. 2013: Scientific Research of Škocjanske Jame Caves (UNESCO World Heritage) – since Antiquity to Modern Time. *In* Slovenian Academy of Sciences and Arts (Hrsg.): *5th Symposium for Research in Protected Areas*. Slovenian Academy of Sciences and Arts, Ljubljana, 415–420.

Kraus, F. 1888: Die Entwässerungsarbeiten in den Kesselthälern von Krain. *Wochenschrift des österr. Ingenieur- und Architekten-Vereines* 13: 1–7

Mattes, J. 2012: Die Eroberung der Tiefe: Mitglieder der k. k. Geologischen Reichsanstalt als Akteure und Förderer der Höhlenforschung unter Tage. *Berichte Geol B-A 95*: 81–114.

Mattes, J. 2013: *Reisen ins Unterirdische – Eine Kulturgeschichte der Höhlenforschung in Österreich bis 1918 im internationalen Kontext*. Dissertation, Universität Wien, Wien, 488 S.

Maynard, J. B. 1983: *Geochemistry of sedimentary ore deposits*. Springer, New York, Heidelberg, Berlin, 305 S.

Mihevc, A., Gabrovšek, F., Knez, M., Kozel, P., Mulec, J., Otoničar, B., Petrič, M., Pipan, T., Prelovšek, M., Slabe, T., Šebela, S., Zupan Hajna, N. 2016: Karst in Slovenia. *Boletín Geológico y Minero* 127: 79–97. https://doi.org/10.21701/bolgeomin.127.1.006.

Mulec, J., Oarga-Mulec, A., Holko, L., Pašić, L., Kopitar, A.N., Eleršek, T., Mihevc, A. 2021: Microbiota entrapped in recently formed ice: Paradana Ice Cave, Slovenia. *Scientific Reports* 11: 1993 (2021). https://doi.org/10.1038/s41598-021-81528-6.

Park Skocjanske Jame 2013: *Höhlen von Skocjan im Herzen des slowenischen Karstes*. Tiskarna VEK, Skocjan, 53 S.

Placer, L. 2008: Principles of the tectonic subdivision of Slovenia. *Geologija* 51: 205–217. https://doi.org/10.5474/geologija.2008.021.

Prpić, B. 1986: Einfluß der Ziegenweide auf die Waldvegetation im küstenländischen Karstgebiet. *AFZ* 30/31: 768–769.

Schmidl, A. 1853: *Wegweiser in die Adelsberger Grotte und die benachbarten Höhlen des Karst. Nach neuen Untersuchungen in den Jahren 1850 – 1852*. Braumüller, Wien, 88 S.

Schmidl, A. 1854: *Die Grotten und Höhlen von Adelsberg, Lueg, Planina und Laas*. Braumüller, Wien, 316 S.

Schneiderhöhn, H. 1962: *Erzlagerstätten. Kurzvorlesungen zur Einführung und Wiederholung*. 4. Auflage, Gustav Fischer, Stuttgart, 371 S.

Seemann, R. 2000: Gesteine, Lagerstätten und Karstlandschaften in Slowenien und im angrenzenden Italien. *Mitt Österr Miner Ges* 146: 331–384.

Silan, S. 1995: *Rakov Škocjan and nature trail*. Grafika Soča, Ljubljana, 59 S.

Tomašević, A. 1986: Der Karst und seine Wiederbewaldung. *AFZ* 30/31: 766-767.

Trontelij, P. 1998: *Der Karst, ober- und unterirdische Lebensvielfalt*. Verlag Jürgen Resch, Überlingen, 127 S.

Vlahović, I., Tišljar, J., Velić, I., Matičec, D. 2002: The Karst Dinarides are composed of relics of a single Mesozoic platform: Facts and consequences. *Geologia Croatica* 55/2: 171–183. https://doi.org/10.4154/GC.2002.15.

Von Steinberg, F. A. 1761: *Gründliche Nachricht von dem in Inner-Crain liegenden Zirknizer-See*. Joseph Moritz Lechner, Grätz, 235 S.

Von Valvasor, J. W. 1689: *Ehre Deß Hertzogthums Crain*. Deutsche Übersetzung Nürnberg. Wolfgang Moritz Endter, Laybach, 773 S.

Vrabec, M., Fodor, L. 2006: Late Cenozoic Tectonics of Slovenia: Structural Styles at the Northeastern Corner of the Adriatic Microplate. *In* Pinter, N., Gyula, G., Weber, J., Stein, S., Medak, D. (Hrsg.): *The Adria Microplate: GPS Geodesy, Tectonics and Hazards*. Springer, Dordrecht, 51–168. https://doi.org/10.1007/1-4020-4235-3_10.

Vrabec, M., Šmuc, A, Pleničar, M., Buser; S. 2009: Geological Evolution of Slovenia – an overview. *In* Plenicar, M., Ogorelec, B., Novak, M. (Hrsg.): *The Geology of Slovenia*. Geološki zavod Slovenje, Ljubljana, 23–40.

Wessely, J. 1876: *Das Karstgebiet Militär-Kroatiens und seine Rettung, dann die Karstfrage überhaupt*. Albrecht und Fiedler, Agram, 366 S.

White, W. B. 2015: Chemistry and karst. *Acta Carsologica* 44: 349–362. https://doi.org/10.3986/ac.v44i3.1896.

Willner, R. 1920: Die Gewinnung von Höhlendünger in Österreich. *Berichte der staatlichen Höhlenkommission* 1: 17–25.

Wolkersdorfer, C., Matschullat, J. ohne Jahr: *Geologische Entstehungsgeschichte Sloweniens nach Prof. Stanko Buser*. Exkursionsführer. 4 S.

Zini, L., Visintin, L., Peric, B., Cucchi, F., Gubrovsek, F. 2010: Transboundary aquifers: Challenges and new directions: Characterisation of a transboundary karst aquifer: the Classical Karst. International Conference "Transboundary Aquifers: Challenges and New Directions (ISARM2010). UNESCO-IAH-UNEP Conference, Paris.

Zupančič, M. 1988: Der Krainisch-Küstenländische Forstverein. *AFZ* 8: 177–178.